



Amanda Taillacq Cabrera

Licenciada em Ciências da Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Estudo das Forças Electrodinâmicas Desenvolvidas em Limitadores de Corrente Supercondutores

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Orientador: Prof. Doutora Anabela Monteiro Gonçalves Pronto, FCT/UNL

Co-orientador: Mestre Nuno Manuel Gonçalves Vilhena, FCT/UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Fernando José Almeida Vieira do
Coito, FCT/UNL

Arguente: Prof. Doutor João Miguel Murta Pina,
FCT/UNL

Vogal: Prof. Doutora Anabela Monteiro Gonçalves
Pronto, FCT/UNL



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro 2014

Estudo das Forças Electrodinâmicas desenvolvidas em Limitadores de Corrente Supercondutores

Copyright © Amanda Taillacq Cabrera, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Aos meus pais e irmão

Aos meus familiares

Aos meus amigos

Agradecimentos

É com este manuscrito que fica marcado o fim da minha etapa de estudante e começa uma nova como uma profissional em evolução. Assim sendo, não podia deixar passar esta oportunidade para agradecer a todas as pessoas que contribuíram para o meu crescimento e formação como ser humano. Realça-se a inexistência de relevância na ordem em que são expostos estes agradecimentos.

Um cálido e sincero agradecimento a todos os docentes que me acompanharam nesta jornada universitária de crescimento mental e cultural. Pelos desafios que me detiveram e puseram a pensar, pelos ensinamentos oferecidos com muita paciência, assim como pelo apoio e direcionamento neste caminho de conhecimentos. Em especial gostava destender os meus agradecimentos à minha orientadora, Professora Anabela Pronto, por todo o tempo disponibilizado para a concepção desta dissertação. Também aos professores Mário Ventim Neves e João Pina pela assistência prestada na elaboração do trabalho.

Não podia deixar de agradecer também ao meu co-orientador de dissertação, Nuno Vilhena e aos colegas do laboratório, pela disponibilidade e ajuda na realização deste trabalho.

Aos meus colegas de curso, com os quais compartilhei momentos inesquecíveis e dias longos de trabalho. Em especial, a Ana Margarida Sebastião, Denise Sardinha, Hugo Martins e João André de Abreu, por serem colegas de estudo e irmãos inseparáveis, amigos nos bons momentos e nos maus também. Porque tem sido em grande parte graças a eles que estou terminando este percurso académico com as metas propostas alcançadas, sem ter deixado de desfrutar e descontraír. Agradeço desde o fundo da minha alma, por o acolhimento e suporte que me deram, e que facilitou a minha total integração na vida escolar e social portuguesa.

À Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, pela disposição e acolhimento durante estes anos de incansável trabalho e estudo.

A todos os meus amigos em Cuba, que mesmo estando longe, têm feito chegar os seus bons desejos e apoio. Em especial a Maribi, Lienny e Yadira, por serem amigas que lutam para que a distância não danifique os fortes laços criados na convivência diária desde a infância e na escola interna. A Maribel Camacho, por todos os seus ensinamentos como professora em uma etapa decisiva na minha formação, assim como por todo o carinho oferecido. A Alejandro, pelo amor, a força e o apoio dado, e que me fizeram seguir esforçando-me quando mais cansada estava.

Ao Mário Almeida, pelos ensinamentos e experiências, assim como pelo suporte ao longo deste percurso.

Aos meus pais por serem os meus melhores amigos e companheiros de aventuras, porque sem eles não estaria onde estou nem seria como sou. Agradeço e não chegam as palavras para expressar todo o que sinto, por todos os sacrifícios que fizeram, pelos ensinamentos e os valores que me inculcaram, e sobre tudo pela confiança e amor que depositaram em mim.

A toda a minha enorme família, pelas recordações, experiências e ensinamentos ao longo da minha vida. Mas em especial ao meu irmãozinho Mario Stefan, a quem eu adoro apesar das birras, e a quem desejo ensinar todo o que puder de forma a contribuir na sua formação e educação.

Sumário

A crescente dependência da energia eléctrica tem proporcionado o desenvolvimento do actual sistema energético, garantindo a continuação da produção e distribuição da electricidade, mantendo sempre um adequado balanço na relação qualidade/preço. Este sistema encontra-se explorando novas fontes de energias, de carácter renováveis, elevando assim a complexidade da rede energética e a probabilidade de ocorrerem falhas devido a correntes de curto-circuito (CC).

Como alternativas para resolver ou prevenir os problemas que advêm das correntes de CC, encontram-se disponíveis dispositivos frequentemente utilizados na limitação das correntes na rede, mas que têm custos importantes associados à substituição e/ou manutenção dos equipamentos. Novas tecnologias que utilizam supercondutividade como principal componente, têm apresentado desempenhos satisfatórios, nomeadamente os limitadores de corrente supercondutores, os quais têm como característica particular, serem invisíveis à rede em funcionamento normal e apresentar elevada impedância em situação de falha, assim como menores tempos de recuperação.

De forma a contribuir para a optimização destes limitadores, é importante identificar e caracterizar os esforços mecânicos aos quais se encontram sujeitos em situações de falha, nomeadamente os seus enrolamentos. Neste trabalho de dissertação, estudam-se e simulam-se os principais esforços electrodinâmicos em transformadores e, principalmente, nos enrolamentos de alguns limitadores de corrente supercondutores.

Termos-chave: Supercondutividade, Transformador de potência, Limitador de corrente supercondutor, Esforços electromecânicos, Força axial, Força radial.

Abstract

The growing dependence of electric power has provided the development of the current energy system, ensuring the continued production and distribution of electricity, always maintaining a proper balance in relationship quality/price. This system is exploring new energy sources, renewable character, raising the complexity of the energy network and the probability of failures due to short-circuit currents (DC).

As alternatives to solve or prevent the problems generated by DC currents are available devices often used in limiting currents on the network, but who have significant costs associated with the replacement and/or maintenance of the equipment. New technologies that utilize superconductivity as main component, have presented satisfactory performances, notably the superconducting current limiters, which have as a particular feature, being invisible to the network during normal operation and provide high impedance fault situation, as well as shorter recovery times.

In order to contribute to the optimization of these limiters, it is important to identify and characterize the mechanical stress to which they are subjected in situations of failure, including its windings. In this dissertation work, study and simulate the main electrodynamic strain in transformers and, mainly, in the windings of some superconducting current limiters.

Keywords: Superconductivity, Power transformers, Superconductor fault current limiter, Electromechanical Stresses, Axial force, Radial force.

Índice

| | |
|--|-----------|
| 1 Introdução | 1 |
| 1.1 Motivação | 1 |
| 1.2 Objectivos | 2 |
| 1.3 Organização da Dissertação | 2 |
| 1.4 Contribuições Originais | 3 |
| 2 Revisão Bibliográfica | 5 |
| 2.1 Materiais Supercondutores de Alta Temperatura (SAT) | 5 |
| 2.1.1 Introdução..... | 5 |
| 2.1.2 Materiais e formatos comerciais dos SAT | 5 |
| 2.1.3 Aplicações | 7 |
| 2.2 Limitadores de Corrente Supercondutores (LCS)..... | 7 |
| 2.2.1 Introdução..... | 7 |
| 2.2.2 Limitadores Resistivos | 8 |
| 2.2.2.1 LCS Resistivo puro | 9 |
| 2.2.2.2 LCS Resistivo com amortecimento assistido por campo magnético | 10 |
| 2.2.3 Limitadores Indutivos..... | 10 |
| 2.2.3.1 Limitador indutivo, de blindagem magnética ou transformador | 11 |
| 2.2.3.2 Núcleos de ferro saturado ou núcleos de ferro polarizados em DC | 12 |
| 2.2.3.3 Outros limitadores indutivos | 13 |
| 2.2.4 Limitadores Rectificadores..... | 15 |
| 2.2.5 Conclusão | 16 |
| 2.3 Esforços Electromecânicos | 16 |
| 2.3.1 Introdução..... | 16 |
| 2.3.2 Esforços Electrodinâmicos em Enrolamentos | 17 |
| 2.3.2.1 Considerações Iniciais..... | 17 |
| 2.3.2.2 Origem das falhas..... | 18 |
| 2.3.3 Forças electrodinâmicas em enrolamentos convencionais | 20 |
| 2.3.3.1 Caracterização das forças electrodinâmicas | 20 |
| 2.3.3.2 Metodologia analítica para o cálculo das forças radiais nos enrolamentos | 22 |
| 2.3.3.3 Metodologia analítica para o cálculo das forças axiais nos enrolamentos | 25 |
| 2.3.3.3.1 Método ampère-espira residual | 25 |
| 2.3.3.3.2 Método dos Elementos Finitos (MEF)..... | 27 |
| 2.3.3.3.3 Outros métodos | 28 |
| 2.3.4 Consequências das falhas por esforços electromecânicos | 30 |
| 2.3.4.1 Efeitos das forças radiais..... | 30 |
| 2.3.4.2 Efeitos das forças axiais | 32 |
| 2.3.5 Estudos e investigações sobre esforços | 34 |
| 2.4 Conclusão | 37 |
| 3 Simulações e análise de resultados | 39 |
| 3.1 Introdução | 39 |

| | |
|--|------------|
| 3.2 Análise dos esforços em transformadores..... | 39 |
| 3.2.1 Transformador monofásico de enrolamentos paralelos | 39 |
| 3.2.1.1 Aspectos físicos e modelo de simulação | 39 |
| 3.2.1.2 Resultados obtidos por simulação | 43 |
| 3.2.2 Transformador trifásico de enrolamentos concêntricos | 54 |
| 3.2.2.1 Aspectos físicos e modelo de simulação | 54 |
| 3.2.2.2 Resultados obtidos por simulação | 56 |
| 3.3 Análise dos esforços em limitadores | 90 |
| 3.3.1 Limitador de corrente supercondutor de núcleos saturados..... | 91 |
| 3.3.1.1 Aspectos físicos e modelo de simulação | 91 |
| 3.3.1.2 Resultados obtidos por simulação | 92 |
| 3.3.2 Limitador de corrente indutivo baseado em fita supercondutora Bi-2223..... | 98 |
| 3.3.2.1 Aspectos físicos e modelo de simulação | 98 |
| 3.3.2.2 Resultados obtidos por simulação | 100 |
| 4 Conclusão..... | 107 |
| 4.1 Considerações Gerais..... | 107 |
| 4.2 Trabalho Futuro | 108 |
| Referências Bibliográficas | 109 |

Índice de Figuras

| | |
|--|----|
| FIGURA 2.1: EVOLUÇÃO TEMPORAL DA TEMPERATURA CRÍTICA DOS MATERIAIS SUPERCONDUTORES DESDE A SUA DESCOBERTA. ADAPTADO DE (ARSÉNIO, 2012)..... | 6 |
| FIGURA 2.2: EXEMPLOS DE SAT DISPONÍVEIS COMERCIALMENTE. A) TUBO PARA BLINDAGEM MAGNÉTICA DE BI-2223, (CAN SUPERCONDUCTORS). B) CABO SUPERCONDUTOR MONOFÁSICO, (NEXANS). C) FITA SUPERCONDUTORA 2G, (AMERICAN SUPERCONDUCTORS)..... | 6 |
| FIGURA 2.3: CLASSIFICAÇÃO DOS LIMITADORES DE CORRENTE SUPERCONDUTORES. | 8 |
| FIGURA 2.4: ESQUEMA ELÉCTRICO DE UM LCS RESISTIVO PURO. ADAPTADO DE (SILVA, 2013). | 9 |
| FIGURA 2.5: FUNCIONAMENTO DO LCS RESISTIVO PURO. ADAPTADO DE (SILVA, 2013)..... | 9 |
| FIGURA 2.6: ESQUEMA ELÉCTRICO DE UM LCS RESISTIVO COM AMORTECIMENTO. ADAPTADO DE (SILVA, 2013).10 | |
| FIGURA 2.7: A) LCS INDUTIVO DE ENROLAMENTOS CONCÊNTRICOS. B) ESQUEMA ELÉCTRICO DO LCS. ADAPTADO DE (SILVA, 2013). | 11 |
| FIGURA 2.8: A) CILINDRO SAT NO ESTADO SUPERCONDUTOR. NÃO EXISTE PENETRAÇÃO DO FLUXO NO NÚCLEO. B) CILINDRO NO ESTADO NORMAL. EXISTE PENETRAÇÃO DO FLUXO DO PRIMÁRIO NO NÚCLEO. ADAPTADO DE (PINA J. , 2010). | 11 |
| FIGURA 2.9: ESQUEMA ELÉCTRICO DE UM LCS DE NÚCLEOS SATURADOS OU POLARIZADOS EM DC. ADAPTADO DE (SILVA, 2013)..... | 12 |
| FIGURA 2.10: PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO LCS DE NÚCLEO SATURADOS. ADAPTADO DE (VILHENA, 2012). | 13 |
| FIGURA 2.11: ESQUEMA ELÉCTRICO DE UM LCS HÍBRIDO. ADAPTADO DE (SILVA, 2013). | 14 |
| FIGURA 2.12: ESQUEMA ELÉCTRICO DE UM LCS DE CAPTURA DE FLUXO. ADAPTADO DE (SILVA, 2013)..... | 14 |
| FIGURA 2.13: ESQUEMA ELÉCTRICO DE UM LCS RECTIFICADOR, TIPO PONTE RECTIFICADORA. ADAPTADO DE (SARAIVA, 2011)..... | 15 |
| FIGURA 2.14: ÁRVORE DE FALHA DOS ENROLAMENTOS. ADAPTADO DE (FRANZÉN & KARLSSON, 2007)..... | 18 |
| FIGURA 2.15: MODELO DE FALHAS EM TRANSFORMADORES, “BATHTUB”. (WIKIPEDIA) | 19 |
| FIGURA 2.16: CAMPOS DE INDUÇÃO O DENSIDADES DE FLUXO MAGNÉTICO DE DISPERSÃO, FORÇAS RADIAIS E AXIAIS NA JANELA DE UM TRANSFORMADOR DE ENROLAMENTOS CONCÊNTRICOS. RETIRADO DE (AZEVEDO, 2007). | 20 |
| FIGURA 2.17: DIRECÇÃO DAS FORÇAS E TENSÕES NO CONDUTOR. ADAPTADO DE (MAHOMED, 2011). | 21 |
| FIGURA 2.18: FORÇAS ELECTROMAGNÉTICAS NUM TRANSFORMADOR CONVENCIONAL SOB CURTO-CIRCUITO. ADAPTADO DE (CABANES ARACIL, LOPEZ-ROLDAN, COETZEE, DARMANN, & TANG, 2012)..... | 22 |
| FIGURA 2.19: SECÇÃO TRANSVERSAL DOS ENROLAMENTOS DE UM TRANSFORMADOR, DISTRIBUIÇÃO DE CAMPO DE INDUÇÃO AXIAL E FORÇAS RADIAIS. ADAPTADO DE (AZEVEDO, DELAIBA, OLIVEIRA, CARVALHO, & BRONZEADO, 2007)..... | 22 |
| FIGURA 2.20: FORÇAS DE TRAÇÃO E COMPRESSÃO NOS ENROLAMENTOS EXTERNO E INTERNOS, RESPECTIVAMENTE. ADAPTADO DE (AZEVEDO, 2007). | 24 |
| FIGURA 2.21: SECÇÃO TRANSVERSAL DOS ENROLAMENTOS DE UM TRANSFORMADOR, DENSIDADE DE FLUXO DE DISPERSÃO RADIAL E FORÇAS AXIAIS. ADAPTADO DE (AZEVEDO, DELAIBA, OLIVEIRA, CARVALHO, & BRONZEADO, 2007)..... | 26 |
| FIGURA 2.22: DIAGRAMA DE F.M.M RESIDUAIS DE ENROLAMENTOS COM DERIVAÇÃO. ADAPTADO DE (AZEVEDO, 2007) (JUNIOR, 2010) (MINHAS, 2007). | 26 |
| FIGURA 2.23: DIAGRAMA DE F.M.M RESIDUAIS PARA CINCO ARRANJOS DE DERIVAÇÕES NOS ENROLAMENTOS. ADAPTADO DE (JUNIOR, 2010). | 27 |
| FIGURA 2.24: MÉTODO DE CÁLCULO DO FLUXO RADIAL PELA MEDIÇÃO DOS VOLT-ESPIRA. ADAPTADO DE (MINHAS, 2007). | 29 |
| FIGURA 2.25: REPRESENTAÇÃO DA BOBINA COMO UM CONDUTOR RECTO BIDIMENSIONAL INFINITAMENTE LONGO. ADAPTADO DE (MINHAS, 2007). | 29 |

| | |
|--|----|
| FIGURA 2.26: TRANSFORMADOR, RESPECTIVOS COMPONENTES E DEFORMAÇÃO “ <i>FORCED BUCKLING</i> ”. EXEMPLO DE TRANSFORMADOR DANIFICADO DEVIDO AO “ <i>FORCED BUCKLING</i> ”. ADAPTADO DE (AZEVEDO, 2007) (JUNIOR, 2010)..... | 31 |
| FIGURA 2.27: DEFORMAÇÃO “ <i>FREE BUCKLING</i> ”. EXEMPLOS DE TRANSFORMADORES DANIFICADOS POR ESTA DEFORMAÇÃO. ADAPTADO DE (JUNIOR, 2010)..... | 31 |
| FIGURA 2.28: VISTA LATERAL DE CONDUTORES COM INCLINAÇÃO ENTRE OS ESPAÇADORES RADIAIS. ADAPTADO DE (AZEVEDO, 2007)..... | 32 |
| FIGURA 2.29: EXEMPLOS DE INCLINAÇÕES ENTRE OS ESPAÇADORES, “ <i>BENDING</i> ”. ADAPTADO DE (JUNIOR, 2010). | 32 |
| FIGURA 2.30: INCLINAÇÃO DOS CONDUTORES DEVIDO A FORÇAS AXIAIS. ADAPTADO DE (AZEVEDO, 2007) (JUNIOR, 2010)..... | 33 |
| FIGURA 2.31: EXEMPLO DE “ <i>TILTING</i> ”. ADAPTADO DE (JUNIOR, 2010)..... | 33 |
| FIGURA 2.32: ENSAIOS DO TRANSFORMADOR TRIFÁSICO DE 15kVA. A) FUNCIONAMENTO NORMAL. B) SOB CURTO-CIRCUITO. C) COM DERIVAÇÃO EM FUNCIONAMENTO NORMAL. D) COM DERIVAÇÃO SOB CURTO-CIRCUITO. ADAPTADO DE (AZEVEDO, ET AL.)..... | 34 |
| FIGURA 2.33: FUNCIONAMENTO NORMAL: A) CORRENTE, B) DENSIDADE DE FLUXO. CURTO-CIRCUITO: C) CORRENTE, D) DENSIDADE DE FLUXO. ADAPTADO DE (AZEVEDO, DELAIBA, OLIVEIRA, CARVALHO, & BRONZEADO, 2007)..... | 35 |
| FIGURA 2.34: FORÇAS RADIAIS. FUNCIONAMENTO NORMAL: A) ENROLAMENTO EXTERNO, B) ENROLAMENTO INTERNO. CURTO-CIRCUITO: C) ENROLAMENTO EXTERNO, D) ENROLAMENTO INTERNO. ADAPTADO DE (AZEVEDO, DELAIBA, OLIVEIRA, CARVALHO, & BRONZEADO, 2007). | 35 |
| FIGURA 2.35: A) LCS COM SAT DA ZENERGYPOWER LTD PTY. B) DENSIDADE DE FLUXO MAGNÉTICO NOS ENROLAMENTOS. ADAPTADO DE (CABANES ARACIL, LOPEZ-ROLDAN, COETZEE, DARMANN, & TANG, 2012). | 36 |
| FIGURA 2.36: IMAGEM MAGNETOSTÁTICA: A) FORÇA RADIAL VOLUMÉTRICA AO LONGO DAS BOBINAS AC, B) FORÇA AXIAL VOLUMÉTRICA AO LONGO DAS BOBINAS AC. ADAPTADO DE (CABANES ARACIL, LOPEZ-ROLDAN, COETZEE, DARMANN, & TANG, 2012)..... | 36 |
| FIGURA 2.37: A) DISTRIBUIÇÃO DE FORÇA RADIAL AO LONGO DAS BOBINAS AC. B) FORÇA AXIAL CUMULATIVA AO LONGO DAS BOBINAS AC. ADAPTADO DE (CABANES ARACIL, LOPEZ-ROLDAN, COETZEE, DARMANN, & TANG, 2012). | 37 |
| FIGURA 3.1: TRANSFORMADOR MONOFÁSICO DE ENROLAMENTOS PARALELOS. RETIRADO DE (FIGUEIRA, 2013). | 40 |
| FIGURA 3.2: MODELO LABORATORIAL DE NÚCLEO DO TRANSFORMADOR. | 40 |
| FIGURA 3.3: ENROLAMENTOS DO TRANSFORMADOR. A) PRIMÁRIO, B) SECUNDÁRIO DE COBRE, C) SECUNDÁRIO DE BI-2223. ADAPTADO DE (FIGUEIRA, 2013). | 41 |
| FIGURA 3.4: A) MODELO DE SIMULAÇÃO DO TRANSFORMADOR MONOFÁSICO. B) MODELO COM MALHA DE ELEMENTOS FINITOS. | 42 |
| FIGURA 3.5: CARACTERÍSTICA DE PRIMEIRA MAGNETIZAÇÃO DO NÚCLEO UTILIZADO. ADAPTADO DE (VILHENA, 2012). | 42 |
| FIGURA 3.6: ESQUEMA ELÉCTRICO DO TRANSFORMADOR UTILIZADO NA SIMULAÇÃO. | 43 |
| FIGURA 3.7: DISTRIBUIÇÃO DA DENSIDADE DE FLUXO MAGNÉTICO EM TRANSFORMADOR MONOFÁSICO. A) CONVENCIONAL EM FUNCIONAMENTO NORMAL. B) CONVENCIONAL EM CC. C) SUPERCONDUTOR EM FUNCIONAMENTO NORMAL. D) SUPERCONDUTOR EM CC..... | 44 |
| FIGURA 3.8: VECTORES DENSIDADE DE FLUXO MAGNÉTICO DISPERSÃO PRESENTES NOS ENROLAMENTOS DO TRANSFORMADOR MONOFÁSICO. A) CONVENCIONAL EM FUNCIONAMENTO NORMAL. B) CONVENCIONAL EM CC. C) SUPERCONDUTOR EM FUNCIONAMENTO NORMAL. D) SUPERCONDUTOR EM CC. | 45 |
| FIGURA 3.9: VECTORES DE FORÇA PRESENTES NOS ENROLAMENTOS DO TRANSFORMADOR MONOFÁSICO. A) CONVENCIONAL EM FUNCIONAMENTO NORMAL. B) CONVENCIONAL EM CC. C) SUPERCONDUTOR EM FUNCIONAMENTO NORMAL. D) SUPERCONDUTOR EM CC..... | 46 |
| FIGURA 3.10: FORÇAS RADIAIS NAS REGIÕES DOS ENROLAMENTOS DO TRANSFORMADOR CONVENCIONAL. DE CIMA PARA BAIXO, ESQUERDA DO PRIMÁRIO, DIREITA DO PRIMÁRIO, ESQUERDA DO SECUNDÁRIO E DIREITA DO SECUNDÁRIO. | 48 |

| | |
|---|----|
| FIGURA 3.11: FORÇAS RADIAIS NAS REGIÕES DOS ENROLAMENTOS DO TRANSFORMADOR SUPERCONDUTOR. DE CIMA PARA BAIXO, ESQUERDA DO PRIMÁRIO, DIREITA DO PRIMÁRIO, ESQUERDA DO SECUNDÁRIO E DIREITA DO SECUNDÁRIO. | 49 |
| FIGURA 3.12: FORÇAS AXIAIS NAS REGIÕES DOS ENROLAMENTOS DO TRANSFORMADOR CONVENCIONAL. DE CIMA PARA BAIXO, ESQUERDA DO PRIMÁRIO, DIREITA DO PRIMÁRIO, ESQUERDA DO SECUNDÁRIO E DIREITA DO SECUNDÁRIO. | 50 |
| FIGURA 3.13: FORÇAS AXIAIS NAS REGIÕES DOS ENROLAMENTOS DO TRANSFORMADOR SUPERCONDUTOR. DE CIMA PARA BAIXO, ESQUERDA DO PRIMÁRIO, DIREITA DO PRIMÁRIO, ESQUERDA DO SECUNDÁRIO E DIREITA DO SECUNDÁRIO. | 52 |
| FIGURA 3.14: CURVA DE ELASTICIDADE. A) CURVA PARA O COBRE, ADAPTADO DE (ROYLANCE, 2001). B) CURVAS PARA COMPÓSITOS DE Bi2223, ADAPTADO DE (OSAMURA, ET AL., 2010). | 53 |
| FIGURA 3.15: MODELO LABORATORIAL DE NÚCLEO DO TRANSFORMADOR. | 54 |
| FIGURA 3.16: A) MODELO DE SIMULAÇÃO DO TRANSFORMADOR TRIFÁSICO. B) MODELO COM MALHA DE ELEMENTOS FINITOS. | 55 |
| FIGURA 3.17: A) MODELO DE TRANSFORMADOR TRIFÁSICO COM DESLOCAÇÃO AXIAL DO ENROLAMENTO. B) MODELO COM MALHA DE ELEMENTOS FINITOS. | 55 |
| FIGURA 3.18: A) MODELO DE TRANSFORMADOR TRIFÁSICO COM DERIVAÇÃO NO SECUNDÁRIO. B) MODELO COM MALHA DE ELEMENTOS FINITOS. | 56 |
| FIGURA 3.19: ESQUEMA ELÉCTRICO DO TRANSFORMADOR. | 56 |
| FIGURA 3.20: DISTRIBUIÇÃO DA DENSIDADE DE FLUXO MAGNÉTICO EM TRANSFORMADOR TRIFÁSICO. A) CONVENCIONAL EM FUNCIONAMENTO NORMAL. B) CONVENCIONAL EM CC. C) SUPERCONDUTOR EM FUNCIONAMENTO NORMAL. D) SUPERCONDUTOR EM CC. | 57 |
| FIGURA 3.21: DISTRIBUIÇÃO DA DENSIDADE DE FLUXO MAGNÉTICO EM TRANSFORMADOR TRIFÁSICO. A) SUPERCONDUTOR COM DERIVAÇÃO EM FUNCIONAMENTO NORMAL. B) SUPERCONDUTOR COM DERIVAÇÃO EM CC. C) SUPERCONDUTOR COM DESLOCAÇÃO EM FUNCIONAMENTO NORMAL. D) SUPERCONDUTOR COM DESLOCAÇÃO EM CC. | 58 |
| FIGURA 3.22: VECTORES DENSIDADE DE FLUXO MAGNÉTICO DE DISPERSÃO PRESENTES NOS ENROLAMENTOS DO TRANSFORMADOR TRIFÁSICO. A) CONVENCIONAL EM FUNCIONAMENTO NORMAL. B) CONVENCIONAL EM CC. C) SUPERCONDUTOR EM FUNCIONAMENTO NORMAL. D) SUPERCONDUTOR EM CC. | 59 |
| FIGURA 3.23: VECTORES DENSIDADE DE FLUXO MAGNÉTICO DE DISPERSÃO PRESENTES NOS ENROLAMENTOS DO TRANSFORMADOR TRIFÁSICO. A) SUPERCONDUTOR COM DERIVAÇÃO EM FUNCIONAMENTO NORMAL. B) SUPERCONDUTOR COM DERIVAÇÃO EM CC. C) SUPERCONDUTOR COM DESLOCAÇÃO EM FUNCIONAMENTO NORMAL. D) SUPERCONDUTOR COM DESLOCAÇÃO EM CC. | 59 |
| FIGURA 3.24: VECTORES DE FORÇA PRESENTES NOS ENROLAMENTOS DO TRANSFORMADOR TRIFÁSICO. A) CONVENCIONAL EM FUNCIONAMENTO NORMAL. B) CONVENCIONAL EM CC. C) SUPERCONDUTOR EM FUNCIONAMENTO NORMAL. D) SUPERCONDUTOR EM CC. | 60 |
| FIGURA 3.25: VECTORES DE FORÇA PRESENTES NOS ENROLAMENTOS DO TRANSFORMADOR TRIFÁSICO. A) SUPERCONDUTOR COM DERIVAÇÃO EM FUNCIONAMENTO NORMAL. B) SUPERCONDUTOR COM DERIVAÇÃO EM CC. C) SUPERCONDUTOR COM DESLOCAÇÃO EM FUNCIONAMENTO NORMAL. D) SUPERCONDUTOR COM DESLOCAÇÃO EM CC. | 61 |
| FIGURA 3.26: FORÇAS RADIAIS NAS REGIÕES DOS ENROLAMENTOS DA PRIMEIRA FASE DO TRANSFORMADOR CONVENCIONAL. DE CIMA PARA BAIXO, ESQUERDA DO PRIMÁRIO, DIREITA DO PRIMÁRIO, ESQUERDA DO SECUNDÁRIO E DIREITA DO SECUNDÁRIO. | 62 |
| FIGURA 3.27: FORÇAS RADIAIS NAS REGIÕES DOS ENROLAMENTOS DA PRIMEIRA FASE DO TRANSFORMADOR SUPERCONDUTOR. DE CIMA PARA BAIXO, ESQUERDA DO PRIMÁRIO, DIREITA DO PRIMÁRIO, ESQUERDA DO SECUNDÁRIO E DIREITA DO SECUNDÁRIO. | 63 |
| FIGURA 3.28: FORÇAS RADIAIS NAS REGIÕES DOS ENROLAMENTOS DA SEGUNDA FASE DO TRANSFORMADOR CONVENCIONAL. DE CIMA PARA BAIXO, ESQUERDA DO PRIMÁRIO, DIREITA DO PRIMÁRIO, ESQUERDA DO SECUNDÁRIO E DIREITA DO SECUNDÁRIO. | 64 |

| | |
|--|----|
| FIGURA 3.29: FORÇAS RADIAIS NAS REGIÕES DOS ENROLAMENTOS DA SEGUNDA FASE DO TRANSFORMADOR SUPERCONDUTOR. DE CIMA PARA BAIXO, ESQUERDA DO PRIMÁRIO, DIREITA DO PRIMÁRIO, ESQUERDA DO SECUNDÁRIO E DIREITA DO SECUNDÁRIO. | 65 |
| FIGURA 3.30: FORÇAS RADIAIS NAS REGIÕES DOS ENROLAMENTOS DA TERCEIRA FASE DO TRANSFORMADOR CONVENCIONAL. DE CIMA PARA BAIXO, ESQUERDA DO PRIMÁRIO, DIREITA DO PRIMÁRIO, ESQUERDA DO SECUNDÁRIO E DIREITA DO SECUNDÁRIO. | 66 |
| FIGURA 3.31: FORÇAS RADIAIS NAS REGIÕES DOS ENROLAMENTOS DA TERCEIRA FASE DO TRANSFORMADOR SUPERCONDUTOR. DE CIMA PARA BAIXO, ESQUERDA DO PRIMÁRIO, DIREITA DO PRIMÁRIO, ESQUERDA DO SECUNDÁRIO E DIREITA DO SECUNDÁRIO. | 67 |
| FIGURA 3.32: FORÇAS AXIAIS NAS REGIÕES DOS ENROLAMENTOS DA PRIMEIRA FASE DO TRANSFORMADOR CONVENCIONAL. DE CIMA PARA BAIXO, ESQUERDA DO PRIMÁRIO, DIREITA DO PRIMÁRIO, ESQUERDA DO SECUNDÁRIO E DIREITA DO SECUNDÁRIO. | 68 |
| FIGURA 3.33: FORÇAS AXIAIS NAS REGIÕES DOS ENROLAMENTOS DA PRIMEIRA FASE DO TRANSFORMADOR SUPERCONDUTOR. DE CIMA PARA BAIXO, ESQUERDA DO PRIMÁRIO, DIREITA DO PRIMÁRIO, ESQUERDA DO SECUNDÁRIO E DIREITA DO SECUNDÁRIO. | 69 |
| FIGURA 3.34: FORÇAS AXIAIS NAS REGIÕES DOS ENROLAMENTOS DA SEGUNDA FASE DO TRANSFORMADOR CONVENCIONAL. DE CIMA PARA BAIXO, ESQUERDA DO PRIMÁRIO, DIREITA DO PRIMÁRIO, ESQUERDA DO SECUNDÁRIO E DIREITA DO SECUNDÁRIO. | 70 |
| FIGURA 3.35: FORÇAS AXIAIS NAS REGIÕES DOS ENROLAMENTOS DA SEGUNDA FASE DO TRANSFORMADOR SUPERCONDUTOR. DE CIMA PARA BAIXO, ESQUERDA DO PRIMÁRIO, DIREITA DO PRIMÁRIO, ESQUERDA DO SECUNDÁRIO E DIREITA DO SECUNDÁRIO. | 71 |
| FIGURA 3.36: FORÇAS AXIAIS NAS REGIÕES DOS ENROLAMENTOS DA TERCEIRA FASE DO TRANSFORMADOR CONVENCIONAL. DE CIMA PARA BAIXO, ESQUERDA DO PRIMÁRIO, DIREITA DO PRIMÁRIO, ESQUERDA DO SECUNDÁRIO E DIREITA DO SECUNDÁRIO. | 72 |
| FIGURA 3.37: FORÇAS AXIAIS NAS REGIÕES DOS ENROLAMENTOS DA TERCEIRA FASE DO TRANSFORMADOR SUPERCONDUTOR. DE CIMA PARA BAIXO, ESQUERDA DO PRIMÁRIO, DIREITA DO PRIMÁRIO, ESQUERDA DO SECUNDÁRIO E DIREITA DO SECUNDÁRIO. | 73 |
| FIGURA 3.38: FORÇAS RADIAIS NA PRIMEIRA FASE DO TRANSFORMADOR CONVENCIONAL E DO SUPERCONDUTOR, EM SITUAÇÃO DE PLENA CARGA. DE CIMA PARA BAIXO, ESQUERDA E DIREITA DO ENROLAMENTO PRIMÁRIO, ESQUERDA E DIREITA DO SECUNDÁRIO. | 74 |
| FIGURA 3.39: FORÇAS RADIAIS NA PRIMEIRA FASE DO TRANSFORMADOR CONVENCIONAL E DO SUPERCONDUTOR, EM SITUAÇÃO DE CURTO-CIRCUITO. DE CIMA PARA BAIXO, ESQUERDA E DIREITA DO ENROLAMENTO PRIMÁRIO, ESQUERDA E DIREITA DO SECUNDÁRIO. | 75 |
| FIGURA 3.40: FORÇAS RADIAIS NA SEGUNDA FASE DO TRANSFORMADOR CONVENCIONAL E DO SUPERCONDUTOR, EM SITUAÇÃO DE PLENA CARGA. DE CIMA PARA BAIXO, ESQUERDA E DIREITA DO ENROLAMENTO PRIMÁRIO, ESQUERDA E DIREITA DO SECUNDÁRIO. | 75 |
| FIGURA 3.41: FORÇAS RADIAIS NA SEGUNDA FASE DO TRANSFORMADOR CONVENCIONAL E DO SUPERCONDUTOR, EM SITUAÇÃO DE CURTO-CIRCUITO. DE CIMA PARA BAIXO, ESQUERDA E DIREITA DO ENROLAMENTO PRIMÁRIO, ESQUERDA E DIREITA DO SECUNDÁRIO. | 76 |
| FIGURA 3.42: FORÇAS RADIAIS NA TERCEIRA FASE DO TRANSFORMADOR CONVENCIONAL E DO SUPERCONDUTOR, EM SITUAÇÃO DE PLENA CARGA. DE CIMA PARA BAIXO, ESQUERDA E DIREITA DO ENROLAMENTO PRIMÁRIO, ESQUERDA E DIREITA DO SECUNDÁRIO. | 77 |
| FIGURA 3.43: FORÇAS RADIAIS NA TERCEIRA FASE DO TRANSFORMADOR CONVENCIONAL E DO SUPERCONDUTOR, EM SITUAÇÃO DE CURTO-CIRCUITO. DE CIMA PARA BAIXO, ESQUERDA E DIREITA DO ENROLAMENTO PRIMÁRIO, ESQUERDA E DIREITA DO SECUNDÁRIO. | 77 |
| FIGURA 3.44: FORÇAS AXIAIS NA PRIMEIRA FASE DO TRANSFORMADOR CONVENCIONAL E DO SUPERCONDUTOR, EM SITUAÇÃO DE PLENA CARGA. DE CIMA PARA BAIXO, ESQUERDA E DIREITA DO ENROLAMENTO PRIMÁRIO, ESQUERDA E DIREITA DO SECUNDÁRIO. | 78 |
| FIGURA 3.45: FORÇAS AXIAIS NA PRIMEIRA FASE DO TRANSFORMADOR CONVENCIONAL E DO SUPERCONDUTOR, EM SITUAÇÃO DE CURTO-CIRCUITO. DE CIMA PARA BAIXO, ESQUERDA E DIREITA DO ENROLAMENTO PRIMÁRIO, ESQUERDA E DIREITA DO SECUNDÁRIO. | 78 |

| | |
|--|----|
| FIGURA 3.46: FORÇAS AXIAIS NA SEGUNDA FASE DO TRANSFORMADOR CONVENCIONAL E DO SUPERCONDUTOR, EM SITUAÇÃO DE PLENA CARGA. DE CIMA PARA BAIXO, ESQUERDA E DIREITA DO ENROLAMENTO PRIMÁRIO, ESQUERDA E DIREITA DO SECUNDÁRIO. | 79 |
| FIGURA 3.47: FORÇAS AXIAIS NA SEGUNDA FASE DO TRANSFORMADOR CONVENCIONAL E DO SUPERCONDUTOR, EM SITUAÇÃO DE CURTO-CIRCUITO. DE CIMA PARA BAIXO, ESQUERDA E DIREITA DO ENROLAMENTO PRIMÁRIO, ESQUERDA E DIREITA DO SECUNDÁRIO. | 80 |
| FIGURA 3.48: FORÇAS AXIAIS NA TERCEIRA FASE DO TRANSFORMADOR CONVENCIONAL E DO SUPERCONDUTOR, EM SITUAÇÃO DE PLENA CARGA. DE CIMA PARA BAIXO, ESQUERDA E DIREITA DO ENROLAMENTO PRIMÁRIO, ESQUERDA E DIREITA DO SECUNDÁRIO. | 81 |
| FIGURA 3.49: FORÇAS AXIAIS NA TERCEIRA FASE DO TRANSFORMADOR CONVENCIONAL E DO SUPERCONDUTOR, EM SITUAÇÃO DE CURTO-CIRCUITO. DE CIMA PARA BAIXO, ESQUERDA E DIREITA DO ENROLAMENTO PRIMÁRIO, ESQUERDA E DIREITA DO SECUNDÁRIO. | 81 |
| FIGURA 3.50: FORÇAS RADIAIS NA PRIMEIRA FASE DO TRANSFORMADOR CONVENCIONAL E DO SUPERCONDUTOR, EM SITUAÇÃO DE PLENA CARGA. DE CIMA PARA BAIXO, ESQUERDA E DIREITA DO ENROLAMENTO PRIMÁRIO, ESQUERDA E DIREITA DO SECUNDÁRIO. | 82 |
| FIGURA 3.51: FORÇAS RADIAIS NA PRIMEIRA FASE DO TRANSFORMADOR CONVENCIONAL E DO SUPERCONDUTOR, EM SITUAÇÃO DE CURTO-CIRCUITO. DE CIMA PARA BAIXO, ESQUERDA E DIREITA DO ENROLAMENTO PRIMÁRIO, ESQUERDA E DIREITA DO SECUNDÁRIO. | 83 |
| FIGURA 3.52: FORÇAS RADIAIS NA SEGUNDA FASE DO TRANSFORMADOR CONVENCIONAL E DO SUPERCONDUTOR, EM SITUAÇÃO DE PLENA CARGA. DE CIMA PARA BAIXO, ESQUERDA E DIREITA DO ENROLAMENTO PRIMÁRIO, ESQUERDA E DIREITA DO SECUNDÁRIO. | 84 |
| FIGURA 3.53: FORÇAS RADIAIS NA SEGUNDA FASE DO TRANSFORMADOR CONVENCIONAL E DO SUPERCONDUTOR, EM SITUAÇÃO DE CURTO-CIRCUITO. DE CIMA PARA BAIXO, ESQUERDA E DIREITA DO ENROLAMENTO PRIMÁRIO, ESQUERDA E DIREITA DO SECUNDÁRIO. | 84 |
| FIGURA 3.54: FORÇAS RADIAIS NA TERCEIRA FASE DO TRANSFORMADOR CONVENCIONAL E DO SUPERCONDUTOR, EM SITUAÇÃO DE PLENA CARGA. DE CIMA PARA BAIXO, ESQUERDA E DIREITA DO ENROLAMENTO PRIMÁRIO, ESQUERDA E DIREITA DO SECUNDÁRIO. | 85 |
| FIGURA 3.55: FORÇAS RADIAIS NA TERCEIRA FASE DO TRANSFORMADOR CONVENCIONAL E DO SUPERCONDUTOR, EM SITUAÇÃO DE CURTO-CIRCUITO. DE CIMA PARA BAIXO, ESQUERDA E DIREITA DO ENROLAMENTO PRIMÁRIO, ESQUERDA E DIREITA DO SECUNDÁRIO. | 85 |
| FIGURA 3.56: FORÇAS AXIAIS NA PRIMEIRA FASE DO TRANSFORMADOR CONVENCIONAL E DO SUPERCONDUTOR, EM SITUAÇÃO DE PLENA CARGA. DE CIMA PARA BAIXO, ESQUERDA E DIREITA DO ENROLAMENTO PRIMÁRIO, ESQUERDA E DIREITA DO SECUNDÁRIO. | 86 |
| FIGURA 3.57: FORÇAS AXIAIS NA PRIMEIRA FASE DO TRANSFORMADOR CONVENCIONAL E DO SUPERCONDUTOR, EM SITUAÇÃO DE CURTO-CIRCUITO. DE CIMA PARA BAIXO, ESQUERDA E DIREITA DO ENROLAMENTO PRIMÁRIO, ESQUERDA E DIREITA DO SECUNDÁRIO. | 86 |
| FIGURA 3.58: FORÇAS AXIAIS NA SEGUNDA FASE DO TRANSFORMADOR CONVENCIONAL E DO SUPERCONDUTOR, EM SITUAÇÃO DE PLENA CARGA. DE CIMA PARA BAIXO, ESQUERDA E DIREITA DO ENROLAMENTO PRIMÁRIO, ESQUERDA E DIREITA DO SECUNDÁRIO. | 87 |
| FIGURA 3.59: FORÇAS AXIAIS NA SEGUNDA FASE DO TRANSFORMADOR CONVENCIONAL E DO SUPERCONDUTOR, EM SITUAÇÃO DE CURTO-CIRCUITO. DE CIMA PARA BAIXO, ESQUERDA E DIREITA DO ENROLAMENTO PRIMÁRIO, ESQUERDA E DIREITA DO SECUNDÁRIO. | 88 |
| FIGURA 3.60: FORÇAS AXIAIS NA TERCEIRA FASE DO TRANSFORMADOR CONVENCIONAL E DO SUPERCONDUTOR, EM SITUAÇÃO DE PLENA CARGA. DE CIMA PARA BAIXO, ESQUERDA E DIREITA DO ENROLAMENTO PRIMÁRIO, ESQUERDA E DIREITA DO SECUNDÁRIO. | 88 |
| FIGURA 3.61: FORÇAS AXIAIS NA TERCEIRA FASE DO TRANSFORMADOR CONVENCIONAL E DO SUPERCONDUTOR, EM SITUAÇÃO DE CURTO-CIRCUITO. DE CIMA PARA BAIXO, ESQUERDA E DIREITA DO ENROLAMENTO PRIMÁRIO, ESQUERDA E DIREITA DO SECUNDÁRIO. | 89 |
| FIGURA 3.62: A) MODELO DE SIMULAÇÃO DO LCS DE NÚCLEO SATURADOS. B) MODELO COM MALHA DE ELEMENTOS FINITOS. ADAPTADO DE (VILHENA, 2012). | 91 |
| FIGURA 3.63: ESQUEMA ELÉCTRICO DO LCS DE NÚCLEOS SATURADOS. | 92 |

| | |
|--|-----|
| FIGURA 3.64: DISTRIBUIÇÃO DA DENSIDADE DE FLUXO MAGNÉTICO EM LCS DE NÚCLEOS SATURADOS. A) FUNCIONAMENTO EM FALHA. B) FUNCIONAMENTO NORMAL. | 93 |
| FIGURA 3.65: VECTORES DE FLUXO MAGNÉTICO DE DISPERSÃO PRESENTES NOS ENROLAMENTOS DO LCS DE NÚCLEOS SATURADOS. A) FUNCIONAMENTO EM FALHA. B) FUNCIONAMENTO NORMAL. | 93 |
| FIGURA 3.66: VECTORES DE FORÇA PRESENTES NOS ENROLAMENTOS DO LCS DE NÚCLEOS SATURADOS. A) FUNCIONAMENTO EM FALHA. B) FUNCIONAMENTO NORMAL. | 94 |
| FIGURA 3.67: FORÇAS RADIAIS NOS ENROLAMENTOS DO LCS EM FUNCIONAMENTO NORMAL. | 94 |
| FIGURA 3.68: FORÇAS RADIAIS NOS ENROLAMENTOS DO LCS EM PRESENÇA DE FALHA. | 95 |
| FIGURA 3.69: FORÇAS AXIAIS NOS ENROLAMENTOS DO LCS EM FUNCIONAMENTO NORMAL. | 96 |
| FIGURA 3.70: FORÇAS AXIAIS NOS ENROLAMENTOS DO LCS EM PRESENÇA DE FALHA. | 97 |
| FIGURA 3.71: BOBINA SUPERCONDUTORA DE DUAS ESPIRAS. ADAPTADO DE (ARSÉNIO, 2012). | 98 |
| FIGURA 3.72: A) MODELO DE SIMULAÇÃO DO LCS INDUTIVO. B) MODELO COM MALHA DE ELEMENTOS FINITOS. | 99 |
| FIGURA 3.73: ESQUEMA ELÉCTRICO DO LCS INDUTIVO. | 99 |
| FIGURA 3.74: DENSIDADE DE FLUXO MAGNÉTICO EM LCS INDUTIVO. A) FUNCIONAMENTO NORMAL. B) FUNCIONAMENTO NO PRIMEIRO PICO DE CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO. C) FUNCIONAMENTO COM CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO LIMITADA. | 100 |
| FIGURA 3.75: VECTORES DE FLUXO DE DISPERSÃO PRESENTES NOS ENROLAMENTOS DO LCS INDUTIVO. A) FUNCIONAMENTO NORMAL. B) FUNCIONAMENTO NO PRIMEIRO PICO DE CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO. C) FUNCIONAMENTO COM CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO LIMITADA. | 101 |
| FIGURA 3.76: VECTORES DE FORÇA PRESENTES NOS ENROLAMENTOS DO LCS INDUTIVO. A) FUNCIONAMENTO NORMAL. B) FUNCIONAMENTO NO PRIMEIRO PICO DE CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO. C) FUNCIONAMENTO COM CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO LIMITADA. | 101 |
| FIGURA 3.77: FORÇAS RADIAIS NOS ENROLAMENTOS DO LCS EM FUNCIONAMENTO NORMAL. | 102 |
| FIGURA 3.78: FORÇAS RADIAIS NOS ENROLAMENTOS DO LCS NO PICO DE CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO. | 102 |
| FIGURA 3.79: FORÇAS RADIAIS NOS ENROLAMENTOS DO LCS NO PRIMEIRO PICO DE CORRENTE LIMITADA. | 103 |
| FIGURA 3.80: FORÇAS AXIAIS NOS ENROLAMENTOS DO LCS EM FUNCIONAMENTO NORMAL. | 103 |
| FIGURA 3.81: FORÇAS AXIAIS NOS ENROLAMENTOS DO LCS NO PICO DE CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO. | 104 |
| FIGURA 3.82: FORÇAS AXIAIS NOS ENROLAMENTOS DO LCS NO PRIMEIRO PICO DE CORRENTE LIMITADA. | 104 |

Índice de Tabelas

| | |
|--|-----|
| TABELA 2.1: MATERIAIS SAT MAIS UTILIZADOS EM APLICAÇÕES DE ENERGIA COM RESPECTIVA TEMPERATURA CRÍTICA. ADAPTADO DE (VILHENA, 2012). | 6 |
| TABELA 2.2: EXPRESSÕES DAS FORÇAS AXIAIS RESULTANTES, PARA CADA ARRANJO DE DERIVAÇÃO, E CORRESPONDENTE VALOR DE A . ADAPTADO DE (JUNIOR, 2010). | 27 |
| TABELA 3.1: CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DA FITA INNOST BI-2223 | 40 |
| TABELA 3.2: VALORES NOMINAIS DAS RELAÇÕES DE TENSÃO/CORRENTE. ADAPTADO DE (FIGUEIRA, 2013). | 41 |
| TABELA 3.3: ESPECIFICAÇÕES UTILIZADAS NAS SIMULAÇÕES DO TRANSFORMADOR. | 43 |
| TABELA 3.4: COMPARAÇÃO DA TENSÃO MECÂNICA OBTIDA POR SIMULAÇÃO NOS ENROLAMENTOS COM O LIMITE ADMISSÍVEL. | 53 |
| TABELA 3.5: COMPARAÇÃO DA TENSÃO MECÂNICA OBTIDA POR SIMULAÇÃO NOS ENROLAMENTOS DO TRANSFORMADOR TRIFÁSICO, COM O LIMITE ADMISSÍVEL. | 89 |
| TABELA 3.6: COMPARAÇÃO DA TENSÃO MECÂNICA OBTIDA POR SIMULAÇÃO NOS ENROLAMENTOS DO TRANSFORMADOR TRIFÁSICO COM DERIVAÇÃO, COM O LIMITE ADMISSÍVEL. | 90 |
| TABELA 3.7: COMPARAÇÃO DA TENSÃO MECÂNICA OBTIDA POR SIMULAÇÃO NOS ENROLAMENTOS DO TRANSFORMADOR TRIFÁSICO COM DESALINHAMENTO, COM O LIMITE ADMISSÍVEL. | 90 |
| TABELA 3.8: ESPECIFICAÇÕES UTILIZADAS NAS SIMULAÇÕES DO LCS DE NÚCLEOS SATURADOS. ADAPTADO DE (VILHENA, 2012). | 92 |
| TABELA 3.9: COMPARAÇÃO DA TENSÃO MECÂNICA OBTIDA POR SIMULAÇÃO NOS ENROLAMENTOS DO LCS DE NÚCLEOS SATURADOS, COM O LIMITE ADMISSÍVEL. | 97 |
| TABELA 3.10: ESPECIFICAÇÕES UTILIZADAS NAS SIMULAÇÕES DO TRANSFORMADOR. | 100 |
| TABELA 3.11: COMPARAÇÃO DA TENSÃO MECÂNICA OBTIDA POR SIMULAÇÃO NOS ENROLAMENTOS DO LCS INDUTIVO, NA SITUAÇÃO DE CURTO-CIRCUITO, COM O LIMITE ADMISSÍVEL. | 105 |

Simbologia

| | |
|---------------|--|
| AT | F.m.m por unidade de comprimento |
| a | Comprimento de derivações em enrolamentos concêntricos |
| a_c | Secção do condutor |
| A_j | Área disponível na janela do transformador |
| A_c | Área que o condutor ocupa na janela do transformador |
| \vec{B} | Vector densidade de fluxo magnético de dispersão ou campo de indução magnética |
| B_a | Campo de indução de dispersão axial |
| B_r | Campo de indução de dispersão radial |
| B_m | Densidade de fluxo máximo |
| c | Módulo equivalente da elasticidade do papel isolante |
| d | Distância radial |
| D_1 | Díodos (D_2, D_3, D_4) |
| D_m | Diâmetro médio de uma espira |
| e | Espessura do condutor |
| E | Módulo de elasticidade do material |
| $E(\delta)$ | Módulo de elasticidade incremental ao valor crítico |
| Esp_{axial} | Quantidade de suporte axiais |
| \vec{f} | Vector densidade de força |
| F | Força |
| F_r | Força radial |
| $F_{rmédio}$ | Força radial média |
| F_a | Força axial |
| h | Altura/comprimento do enrolamento |
| h_a | Dimensão axial do condutor |
| H | Campo magnético |
| i_{linha} | Corrente na linha |

| | |
|------------------|---|
| I | Corrente eléctrica |
| I_{max} | Corrente eléctrica máxima |
| I_0 | Corrente DC |
| I_{DC} | Corrente DC |
| I_{CC} | Corrente curto-circuito |
| I_N | Corrente nominal |
| I_p | Corrente prospetiva |
| μ_0 | Permeabilidade magnética do vazio |
| \vec{J} | Vector densidade de corrente |
| k contiguas | Fracção do comprimento total do enrolamento que é ocupado por uma das porções |
| k_l | Coeficiente de empilhamento |
| k_f | Coeficiente de preenchimento |
| K | Temperatura em Kelvin |
| K_u | Coeficiente de utilização da janela |
| K_j | Coeficiente que relaciona a secção do núcleo com a área disponível na janela |
| l | Comprimento de uma espira |
| l_{eff} | Comprimento efectivo do caminho percorrido pelo fluxo |
| L | Distância entre espaçadores axiais |
| L_{amort} | Indutância de amortecimento |
| L_{SAT} | Indutância supercondutora |
| n | Número de espiras de uma bobina |
| N_1 | Número de espiras de uma bobina (N_2) |
| N_f | Matriz função de forma |
| m | Número de cunhas |
| r_1 | Raios de circunferência (r, r_2) |
| R_p | Resistência de protecção do supercondutor |
| R_N | Resistência nominal |

| | |
|---------------------------|---|
| R_c | Resistência de carga |
| s | Comprimento dos espaçadores |
| S_1 | Interruptor |
| S_e | Secção transversal das espiras |
| S_{fe} | Secção do núcleo |
| U_{ef} | Tensão eficaz |
| U_{DC} | Tensão DC |
| U_{Pol} | Tensão de polarização |
| U_{rede} | Tensão na rede |
| U_C | Tensão na carga |
| V | Volume |
| x | Constante fornecida pelo fabricante sobre a espessura do condutor |
| Z_{rede} | Impedância da rede |
| $\sigma_{médio}$ | Tensão mecânica radial de tracção médio |
| σ_{el} | Tensão mecânica radial crítico causado pela encurvadura livre, “ <i>free buckling</i> ” |
| σ_{ef} | Tensão mecânica radial crítico causado pela encurvadura forçada, “ <i>forced buckling</i> ” |
| σ_b (“Bending”) | Tensão mecânica perante inclinações entre os espaçadores colocados radialmente. |
| σ_{crit} | Tensão mecânica crítica |

Notações

| | |
|----------------------|---|
| 1G | Fita supercondutora de primeira geração |
| 2D | Entidades com duas dimensões, espaço bidimensional |
| 2G | Fita supercondutora de segunda geração |
| 3D | Entidades com três dimensões, espaço tridimensional |
| AC | Alternating Current |
| AT | Alta Tensão (entre 45 kV e 110 kV) |
| BSCCO | Bismuth Strontium Calcium Copper Oxide |
| Bi-2212 (BSCCO-2212) | Supercondutor de composição química $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_1\text{Cu}_2\text{O}_8$ |
| Bi-2223 (BSCCO-2223) | Supercondutor de composição química $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{12}$ |
| BT | Baixa Tensão (inferior a 1 kV) |
| CC | Curto-Circuito |
| DC | Direct Current |
| <i>fmm</i> | Força magnetomotriz (Ae) |
| GD | Geração Distribuída |
| LCS | Limitador de Corrente Supercondutor |
| MEF | Método dos Elementos Finitos |
| MT | Média Tensão (entre 1 kV e 45 kV) |
| PC | Plena Carga |
| SAT | Supercondutor de Alta Temperatura |
| SC | Supercondutor(a) |
| SMES | Superconducting Magnetic Energy Storage |
| TC | Transformador convencional de enrolamentos de cobre |
| TSC | Transformador supercondutor |
| YBCO | Yttrium Barium Copper Oxide |
| Y-123 | YBCO na sua fase supercondutora |

1 Introdução

1.1 Motivação

Um facto que se verifica na sociedade actual é a crescente dependência da energia eléctrica. O aumento considerável do seu consumo nos últimos tempos impôs mudanças no sistema energético. Estas visam garantir a continuidade da produção e distribuição da electricidade, sem esquecer a necessidade de ter um balanço na relação qualidade/preço.

No panorama actual, a sustentabilidade energética tem sido uma preocupação constante, i.e., a utilização racional da energia eléctrica por forma a diminuir o impacto ambiental e económico que resulta da sua geração. Derivado de programas de sustentabilidade energética, tem existido um auge nas tecnologias de produção de energia a partir de recursos renováveis, permitindo a redução da utilização das matérias-primas fósseis, as quais têm contribuído fortemente para o aumento da poluição ambiental. Com estes avanços tecnológicos, verifica-se uma expansão do mercado energético, resultando numa maior competitividade a nível de eficiência, qualidade e fiabilidade.

Com a emergente exploração das fontes renováveis de energia e o consequente aumento da geração distribuída (GD), surgem redes energéticas cada vez mais complexas, que levam à necessidade de realizar reforços no actual sistema de energia.

Também como consequência do aumento da geração de energia existe um incremento na probabilidade de surgirem falhas, como por exemplo, correntes de curto-circuito (CC) na rede. Estas correntes podem criar enormes prejuízos económicos e sociais, associados aos danos físicos da rede eléctrica, linhas e equipamentos, que indisponibilizam este serviço para os consumidores.

Perante a possibilidade de ocorrências de falhas importantes, como as já referidas, é prudente fortalecer a rede de modo a que esta esteja preparada para suportar fortes alterações no trânsito da energia. Como alternativas para resolver ou prevenir os problemas que advêm das correntes de CC, encontram-se disponíveis dispositivos frequentemente utilizados na limitação das correntes na rede, tais como, transformadores de alta impedância, disjuntores de elevada corrente, fusíveis explosivos, bobinas com núcleo de ar e impedâncias. No entanto, verifica-se que nenhum deles é realmente eficiente em termos económicos, existindo custos associados à substituição e/ou manutenção dos equipamentos.

Da contínua busca pela optimização do sistema energético, ligado ao progressivo estudo das propriedades dos materiais supercondutores, surgem potenciais soluções de aplicações na limitação de correntes CC, tal como, o limitador de corrente supercondutor (LCS). Estas novas tecnologias que utilizam o fenómeno da supercondutividade, têm apresentado desempenhos satisfatórios, verificando-se uma maior resistência às falhas, inferiores tempos de actuação em situações de curto-circuito, reduções nas perdas existentes no dispositivo, assim como também possibilitou a diminuição do volume físico dos equipamentos.

O mercado emergente para os dispositivos supercondutores, nomeadamente os limitadores de corrente, exhibe ainda um elevado número de barreiras, principalmente associadas aos custos de dimensionamento e produção. Mas, atualmente os distribuidores e produtores de energia encontram-se

mais abertos à ideia de utilizar esta tecnologia, mantendo como foco dos seus investimentos, o elevado rendimento e eficiência de protecção do complexo sistema energético actual.

Já que se pretende expandir a utilização deste tipo de limitadores, é necessário realizar estudos que garantam aos investidores a segurança do funcionamento dos mesmos. Não só é importante analisar o desempenho do equipamento quando introduzido na rede, mas também o que protege o próprio dispositivo. É por esse motivo que é essencial determinar os factores que degradam os LCS, especialmente os esforços aos quais estes se encontram sujeitos em situações de falhas. Este aspecto foi o que motivou a realização desta dissertação.

1.2 Objectivos

De forma geral esta dissertação tem como principal objectivo estudar as forças electrodinâmicas aplicadas aos enrolamentos dos limitadores de corrente supercondutores. Para tal partir-se-á de estudos já desenvolvidos para outros dispositivos que utilizam estes materiais, tal como, o transformador supercondutor.

Como objectivos específicos têm-se:

- ❖ Identificação e caracterização das forças presentes nos enrolamentos dos LCS.
- ❖ Estudo teórico de metodologias analíticas desenvolvidas para o cálculo de esforços electrodinâmicos em bobinas de transformadores.
- ❖ Simulação por elementos finitos, do comportamento de modelos de transformadores e limitadores supercondutores, em diferentes condições.
- ❖ Identificação dos efeitos que resultam dos esforços perante correntes de curto-circuito.
- ❖ Análise crítica dos resultados, com vista a validar a utilização das metodologias desenvolvidas para o estudo dos esforços em limitadores supercondutores.

1.3 Organização da Dissertação

Esta dissertação está dividida em quatro capítulos, são eles:

Capítulo 1 – Introdução: Este capítulo visa introduzir o trabalho em questão, as motivações que levam à execução do mesmo, assim como os objectivos que se pretendem alcançar.

Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica: Compreende um estudo resumido dos elementos mais significativos para o desenvolvimento do trabalho. Faz-se referência aos materiais supercondutores de alta temperatura (SAT), passando por uma pequena parte da história da sua descoberta, os materiais e formatos existentes, assim como as suas aplicações. São também resumidos os temas relacionados com os tipos de limitadores de corrente, salientando algumas topologias de interesse. Finalmente é introduzida a temática dos esforços electromecânicos em enrolamentos, sendo aqui apresentadas as origens, as características, as consequências e as metodologias de cálculo das forças electrodinâmicas em enrolamentos convencionais e supercondutores empregados em transformadores e limitadores.

Capítulo 3 – Simulações e análise de resultados: O capítulo segue os passos necessários, na realização das simulações dos transformadores e limitadores supercondutores, apresentando-se os esforços desenvolvidos obtidos pelo método de elementos finitos.

Capítulo 4 – Conclusão: São apresentadas as conclusões retiradas deste trabalho através de uma discussão geral dos resultados. Indicam-se também alguns trabalhos que podem e devem ser desenvolvidos futuramente.

1.4 Contribuições Originais

Com base em modelos de transformadores e limitadores de corrente supercondutores, existentes em pequena escala no laboratório, o presente trabalho pretende aportar como contribuição original, a avaliação dos esforços electromecânicos que estes sofrem sob condições de curto-circuito. Pretende também, fornecer as bases que permitam *a posteriori* a validação das metodologias analíticas e de simulação nos modelos reais por meio de medições, podendo ainda ser utilizadas na previsão das forças exercidas em enrolamentos supercondutores de outros dispositivos electromagnéticos.

2 Revisão Bibliográfica

Neste capítulo serão abordados temas relevantes na elaboração desta dissertação. Procede-se ao levantamento bibliográfico dos conceitos e propriedades sobre os materiais supercondutores de alta temperatura (SAT), os tipos de limitadores de corrente supercondutores e os esforços electromecânicos em enrolamentos, que são de maior interesse. Apresenta-se também o estado da arte referente às metodologias de cálculo das forças electrodinâmicas em enrolamentos.

2.1 Materiais Supercondutores de Alta Temperatura (SAT)

2.1.1 Introdução

Em 1911, o físico alemão Heike Kamerlingh Onnes, descobre propriedades supercondutoras em certos materiais quando estes se encontram a baixas temperaturas. Surge assim, uma importante linha de estudo para o desenvolvimento tecnológico. A aplicação de supercondutores esteve limitada por algumas décadas, devido ao facto de só serem conhecidos materiais que atingiam o estado supercondutor em temperaturas abaixo dos 20 K, e que resultam em aplicações mais dispendiosas por causa dos custos associados aos sistemas de refrigeração.

Em 1986, os investigadores da IBM, Georg Bednorz e Alexander Müller, observaram que alguns compostos, especialmente cerâmicos, apresentavam valores de temperatura crítica superiores aos 30 K, lançando assim uma nova gama de materiais supercondutores conhecidos hoje como supercondutores de alta temperatura, SAT.

Contudo, existe ainda uma divergência quanto à definição de SAT: alguns investigadores consideram que os SAT são aqueles que apresentam temperatura crítica superior à temperatura de ebulição do azoto líquido, ou seja, 77 K, e outros, que são os materiais que perdem o estado supercondutor ao ultrapassar os 30 K. Será a primeira definição a tida em conta nesta dissertação.

2.1.2 Materiais e formatos comerciais dos SAT

Verifica-se através da Figura 2.1, que o valor da temperatura crítica dos materiais supercondutores (SC) tem evoluído consideravelmente desde a sua descoberta, sendo possível observar maiores alterações a partir da descoberta dos SAT.

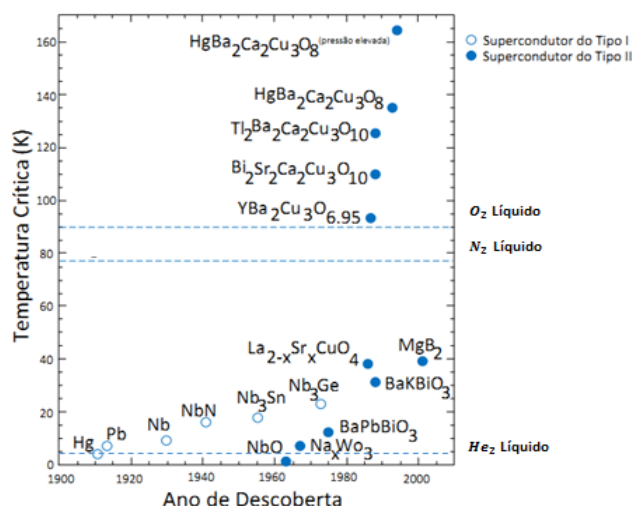


Figura 2.1: Evolução temporal da temperatura crítica dos materiais supercondutores desde a sua descoberta. Adaptado de (Arsénio, 2012).

A busca por materiais mais viáveis comercialmente, reflecte-se, na possibilidade de obter supercondutividade com sistemas de arrefecimento mais económicos, isto é, utilizando azoto líquido. Os mais generalizados e produzidos na indústria actual, em aplicações de energia, são os materiais cerâmicos compostos à base de óxidos de cobre, YBCO e BSCCO. Na Tabela 2.1 apresentam-se a composição e temperaturas críticas desses materiais.

Tabela 2.1: Materiais SAT mais utilizados em aplicações de energia com respectiva temperatura crítica. Adaptado de (Vilhena, 2012).

| SAT | Fórmula Química | Temperatura Crítica (K) |
|-------|---|-------------------------|
| YBCO | $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ | 92 |
| BSCCO | $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_n\text{Cu}_{n+1}\text{O}_{6+2n}$ | 105 |

Os SAT acima mencionados apresentam-se em diversos formatos, de acordo com a finalidade a que se destinam. Podemos encontrar estes supercondutores na forma de blocos maciços, fitas ou cabos como ilustra a Figura 2.2.

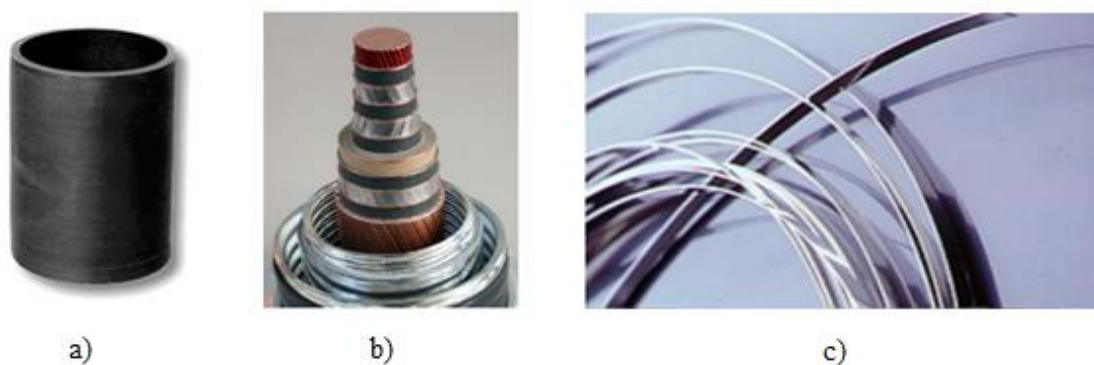


Figura 2.2: Exemplos de SAT disponíveis comercialmente. a) Tubo para blindagem magnética de Bi-2223, (CAN Superconductors). b) Cabo supercondutor monofásico, (Nexans). c) Fita supercondutora 2G, (American Superconductors).

Encontram-se no mercado blocos maciços monocristalinos ou policristalinos, sendo que os primeiros apresentam um valor de densidade de corrente maior, comparativamente aos segundos.

As fitas supercondutoras mais utilizadas podem ser de primeira geração, 1G, ou de segunda geração, 2G. As primeiras são constituídas por filamentos de BSCCO embebidos numa matriz de prata, que conferem ao supercondutor maior robustez mecânica e flexibilidade. A flexibilidade conferida pela matriz é limitada a umas dezenas de milímetros de raio de curvatura, a partir dos quais as fitas começam a perder as suas propriedades supercondutoras. As fitas 1G, exibem alguma sensibilidade a campos magnéticos externos, chegando a apresentar densidades de corrente nula perante estes campos. Já as fitas de 2G, conhecidas de condutores a base de Y-123, podem ser compostas por quatro camadas principais resultantes de um processo de fabrico mais complexo, elevando assim o seu preço face às de 1G. As quatro camadas principais constituintes das fitas são: camada de substrato metálico, camada *buffer* (constituída por várias subcamadas que facilitam a aderência, texturização, etc.), camada com material SAT e camada estabilizante de prata ou cobre. Esta configuração proporciona à fita maior robustez mecânica, para além de campos, temperaturas e densidades de correntes críticas superiores em relação às de primeira geração.

Os cabos supercondutores constituem uma solução alternativa aos cabos convencionais utilizados na indústria energética actual, visto que apresentam uma melhor condutividade eléctrica, reduzindo assim as perdas geradas por efeito de Joule e as quedas de tensão ao longo dos cabos.

2.1.3 Aplicações

O mercado que constitui o maior alvo de utilização de SAT, é o energético, podendo encontrar-se estes materiais em cabos eléctricos, máquinas eléctricas rotativas, sistemas de armazenamento de energia (SMES), transformadores de potência e limitadores de corrente. Contudo, existem algumas outras aplicações nas quais estes materiais podem ser encontrados, tais como, em chumaceiras magnéticas, levitação electromagnética utilizada em transportes, em equipamentos de aplicação médica e científica como os dispositivos de ressonância magnética e o acelerador de partículas do CERN, além de aplicações de âmbito militar e espacial.

2.2 Limitadores de Corrente Supercondutores (LCS)

2.2.1 Introdução

O sistema energético actual encontra-se em constante crescimento, verificando-se um aumento contínuo da geração distribuída que junto com a integração destas fontes de produção de energia na rede, leva ao aumento da complexidade da mesma. Eleva-se assim, a complexidade do sistema de protecção necessário para garantir a fiabilidade e a segurança da rede eléctrica. Na busca por otimizar as tecnologias que permitem a resolução dos possíveis problemas técnicos que podem ser originados na rede, surge a ideia de aplicar materiais supercondutores para limitar correntes de CC provenientes das falhas.

Os limitadores de corrente supercondutores (LCS) são devido às propriedades destes materiais, limitadores por natureza. Em estado supercondutor, estes têm a capacidade de suportar grandes densidades de corrente, apresentando uma impedância desprezável, o que os torna invisíveis para a rede. Contudo, caso exista uma falha, o LCS perde o estado supercondutor e torna-se resistivo, logo é conseguida uma limitação das correntes.

De forma geral, as propriedades que os limitadores devem apresentar são (Pina J. , 2010) (Arsénio, 2012) (Silva, 2013):

- i. Impedância variável, isto é, apresentar impedância baixa em funcionamento normal da rede e elevada quando existir falha, permitindo a correta limitação de corrente.
- ii. Reduzidos tempos de acção e recuperação perante falhas ocorridas na rede.
- iii. Fiabilidade e segurança para os elementos já existentes no sistema energético.
- iv. Baixos custos, associados à produção, manutenção e impacto ambiental.

Os LCS são classificados consoante a forma e o local da rede no qual são introduzidos, e podem ser monofásicos ou trifásicos, como está esquematizado na Figura 2.3. (Pina J. , 2010) (Arsénio, 2012) (Silva, 2013) (Vilhena, 2012)

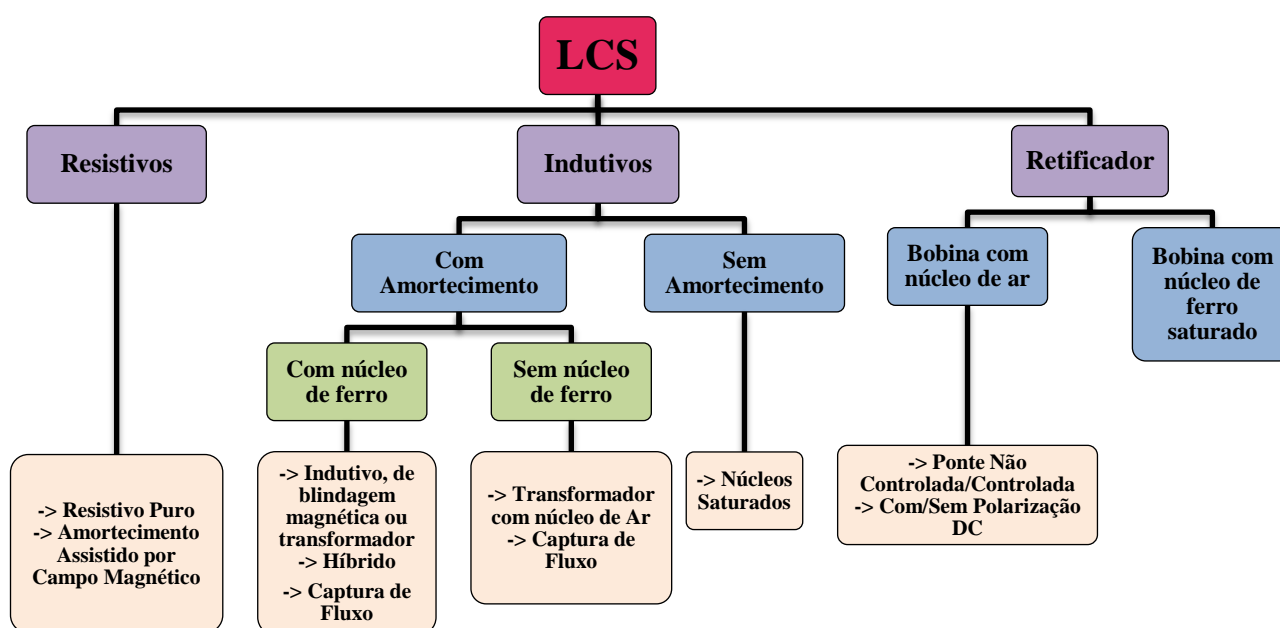


Figura 2.3: Classificação dos limitadores de corrente supercondutores.

Podem ser encontrados LCS nos ramais de entrada e saída dos postos de transformação, nas interligações entre redes de distribuição, nas interligações entre barramentos, ligados a fontes de produção descentralizadas, como acoplamentos de sub-redes e em combinação com outros dispositivos supercondutores, entre outros.

2.2.2 Limitadores Resistivos

Nesta secção são introduzidos de forma breve o princípio de funcionamento de alguns limitadores, ditos resistivos, e que são apresentados na literatura existente como os que mais aplicações têm. São eles os limitadores resistivos puros e os de amortecimento assistido por campo magnético.

2.2.2.1 LCS Resistivo puro

O LCS resistivo puro, utiliza as propriedades dos materiais SC, de forma natural, na limitação de correntes. O seu princípio de funcionamento é, simplesmente, a passagem do material do estado supercondutor para o estado normal, também conhecido por “*quench*” (Pina J. , 2010) (Silva, 2013). Constitui um dos modelos menos complexos entre os limitadores supercondutores, sendo composto por um SAT em série com a linha, e por uma resistência em paralelo com o SC, como se mostra na Figura 2.4.

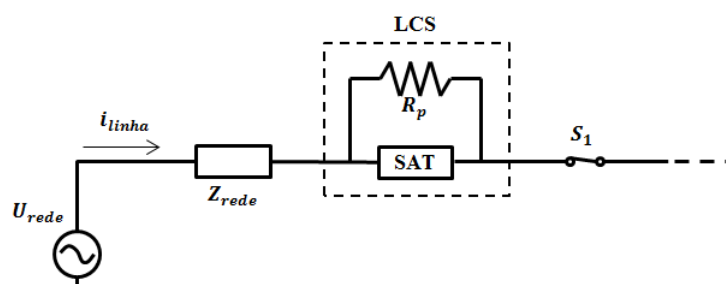


Figura 2.4: Esquema eléctrico de um LCS resistivo puro. Adaptado de (Silva, 2013).

Este modelo resistivo puro, é invisível à rede em funcionamento normal, como ilustra a Figura 2.5, visto que o material SC quando arrefecido, apresenta impedância reduzida. Se existir uma falha na linha, verifica-se um pico na corrente que ultrapassa a corrente crítica do material, levando-o para fora do estado supercondutor, e elevando assim, para um valor considerável a resistência, o que dá origem à limitação da corrente (Pina J. , 2010) (Silva, 2013). A resistência R_p , tem como principal objectivo, a protecção do material SAT dos chamados “*hot spots*”, que surgem na comutação de estado, se esta não for feita de forma homogénea ao longo do material. Esta resistência funciona então, como uma ponte ou caminho alternativo, para a passagem de corrente, além de ter a vantagem de evitar o aparecimento de sobretensões no SC, perante transições de estado abruptas.

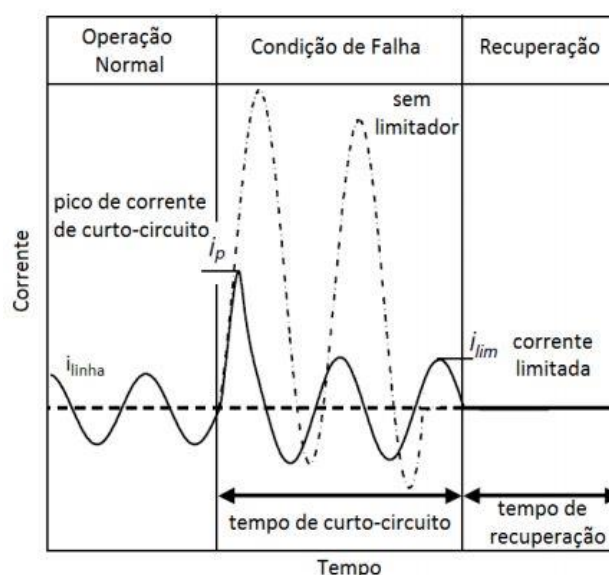


Figura 2.5: Funcionamento do LCS resistivo puro. Adaptado de (Silva, 2013).

Foram vários os projectos e investigações dedicados a este tipo de limitadores, mas foram posteriormente abandonados devido ao facto do amortecimento, “*quench*”, poder degradar de forma irreversível o material supercondutor em forma de bloco. O LCS resistivo puro, provavelmente mais conhecido, foi o instalado na rede eléctrica alemã de RWE em Netphen, na Alemanha, no 2004. Este projecto, chamado de CURL10, consistia num LCS de 10kV/10MVA, de bobinas bifilares de BSCCO-2212 maciço e temperatura de operação de 66 K. No entanto, com a produção das fitas de 2G esta topologia de LCS voltou a ser seleccionada para protótipos como, por exemplo, o usado no projecto ECCOFLOW (Eccoflow).

2.2.2.2 LCS Resistivo com amortecimento assistido por campo magnético

Os LCS resistivos com amortecimento assistido por campo magnético, são a evolução nos limitadores resistivos, ou seja, surgem como alternativa para a erradicação do amortecimento não homogéneo, isto é, formação de pontos quentes no material SC, que afectam alguns dos LCS resistivos puros. A relação existente entre a corrente crítica do SC, a partir da qual acontece o amortecimento, e os campos magnéticos, que aceleram as transições de estado nos SAT, é a base do funcionamento destes LCS.

Neste modelo a resistência é substituída por uma bobina, como mostra a Figura 2.6, a qual é percorrida pela corrente desviada do caminho do SAT, devido ao aumento da resistência do material perante falhas, e que gera um campo magnético que força a aceleração e homogeneidade do amortecimento, ao fazer diminuir a corrente crítica dos pontos do SAT que ainda estão no estado supercondutor. Com a aceleração da transição imposta pela aplicação do campo magnético, evita-se o aparecimento de pontos quentes.

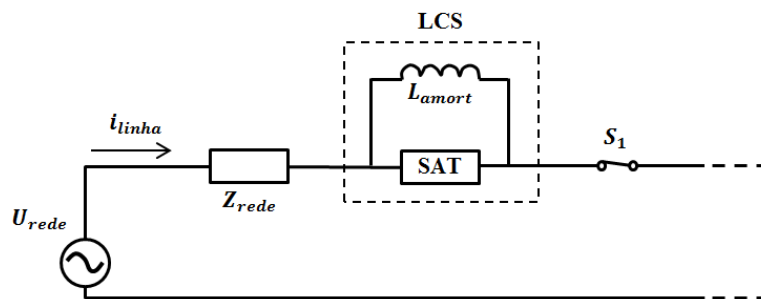


Figura 2.6: Esquema eléctrico de um LCS resistivo com amortecimento. Adaptado de (Silva, 2013).

Com base no LCS resistivo puro, do projecto CURL10, surge o CULT 110, onde são aproveitados alguns conceitos do antecessor, como a ideia de supercondutores em tubos de BSCCO-2212, mas agora monofilares em lugar de bifilares.

2.2.3 Limitadores Indutivos

Os limitadores do tipo indutivo são caracterizados pela utilização de fenómenos magnéticos no seu princípio funcionamento. Existem topologias destes LCS, que podem apresentar núcleos de ferro ou de ar, assim como podem ou não realizar a transição de estado nos SAT. Os modelos a descrever resumidamente nesta secção são os limitadores de blindagem magnética ou transformador, os de núcleo de ar, os de núcleos de ferro saturados ou núcleos de ferro polarizados em DC, os híbridos e os de captura de fluxo.

2.2.3.1 Limitador indutivo, de blindagem magnética ou transformador

As semelhanças construtivas e de funcionamento do LCS indutivo em relação aos transformadores convencionais, são o que originou o seu nome. Este é constituído por um enrolamento primário de cobre, um enrolamento secundário de SAT, geralmente um cilindro maciço arrefecido num crióstato, e por um núcleo de ferro. Normalmente os enrolamentos são colocados de forma concêntrica em torno do núcleo, onde o primário é ligado à linha a ser protegida, como ilustra a Figura 2.7 a) e b). O secundário nesta montagem equivale a ter um curto-circuito num transformador, sempre que estiver em condições normais de funcionamento.

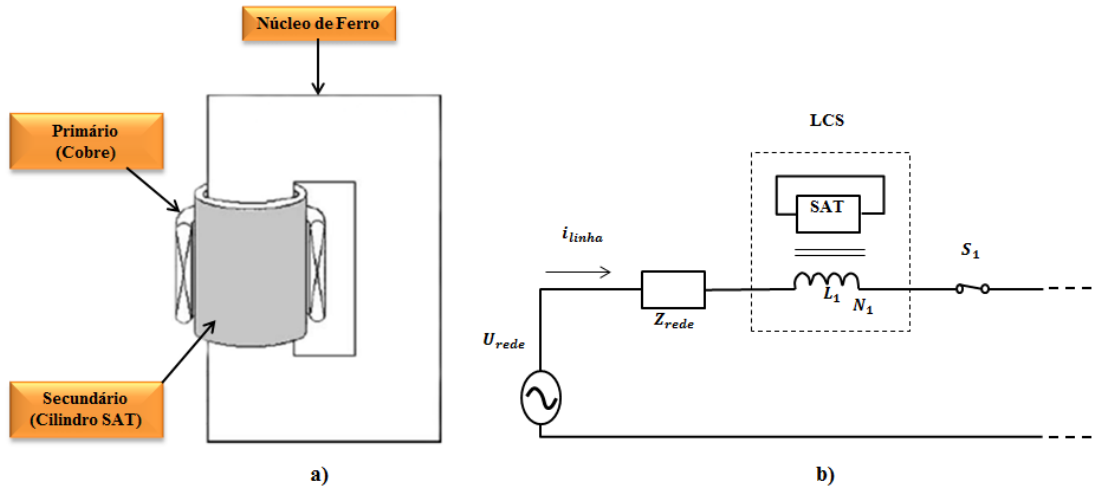


Figura 2.7: a) LCS indutivo de enrolamentos concêntricos. b) Esquema eléctrico do LCS. Adaptado de (Silva, 2013).

Durante o funcionamento normal do dispositivo, o primário induz uma corrente no SAT, inferior ao valor da corrente crítica, pelo que o secundário mantém o estado supercondutor, e realiza a blindagem magnética do núcleo. Nestas circunstâncias, o LCS é invisível para a rede, pois a impedância é dada somente pela impedância do primário e pela dispersão do dispositivo representada em Figura 2.8 a).

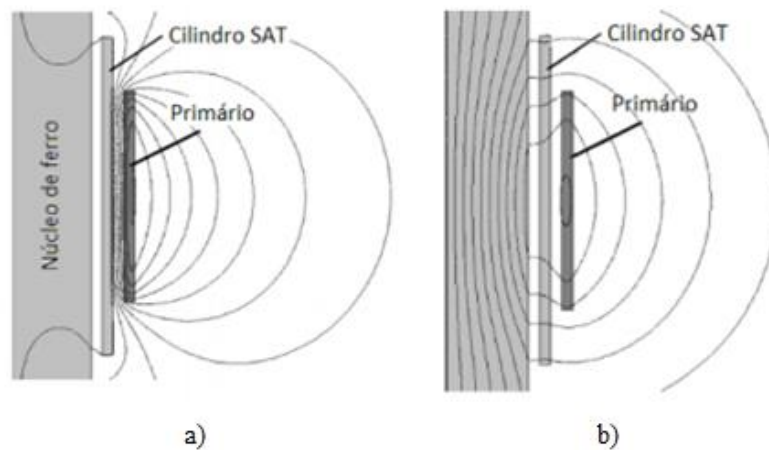


Figura 2.8: a) Cilindro SAT no estado supercondutor. Não existe penetração do fluxo no núcleo. b) Cilindro no estado normal. Existe penetração do fluxo do primário no núcleo. Adaptado de (Pina J. , 2010).

Ao existir uma falha na linha, a corrente induzida consegue ultrapassar a corrente crítica do supercondutor levando-o para o estado normal, e quebrando assim a blindagem magnética do núcleo.

A limitação da corrente com estes LCS, é dada pelo aumento considerável do fluxo ligado com o primário, resultado da perda da blindagem, que incrementa o coeficiente de indução, e consequentemente a impedância total do dispositivo, ilustrado em Figura 2.8 b).

Estes LCS têm como vantagem, o acto de permitirem continuar a utilizar a linha em caso de defeito no próprio equipamento. Também se verifica que os custos e rendimento associados ao sistema de refrigeração, são mais baixos, uma vez que em funcionamento normal, o SAT não aquece. Os limitadores indutivos de blindagem magnética têm como desvantagem o seu peso e volume, resultantes da utilização de núcleo de ferro, para além, do problema do amortecimento e da degradação dos materiais SC, devido às mudanças de estado de forma não homogénea.

2.2.3.2 Núcleos de ferro saturado ou núcleos de ferro polarizados em DC

Esta topologia foi proposta inicialmente por (Raju, Parton, & Bartram, 1982), e o limitador é constituído por dois núcleos de ferro fortemente saturados, bobinas AC, bobinas DC de material SAT e uma fonte DC de baixa tensão. Os enrolamentos AC encontram-se ligados directamente à linha a ser protegida, Figura 2.9, e as suas polaridades garantem que os fluxos ligados de origem AC e DC têm sentidos opostos no núcleo de ferro em qualquer instante. A fonte DC encarrega-se de alimentar o enrolamento DC, mantendo os núcleos de ferro saturados.

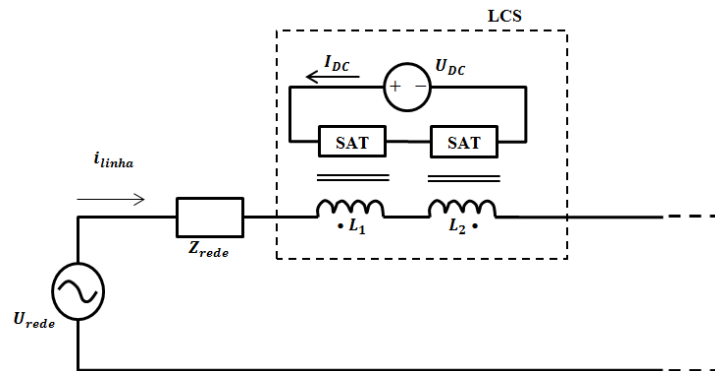


Figura 2.9: Esquema eléctrico de um LCS de núcleos saturados ou polarizados em DC. Adaptado de (Silva, 2013).

O funcionamento do LCS, tem como base o gráfico da Figura 2.10, sendo que em estado normal os núcleos permanecem saturados, já que a corrente existente na linha não é suficiente para os tirar desse estado de operação, logo as indutâncias que contribuem para a impedância do dispositivo são reduzidas, contribuindo então para esta impedância só a resistência dos enrolamentos AC.

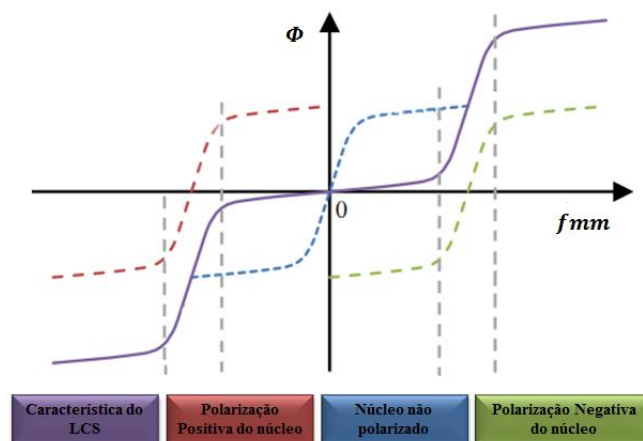


Figura 2.10: Princípio de funcionamento do LCS de núcleo saturados. Adaptado de (Vilhena, 2012).

Em presença de um curto-circuito, a corrente na linha leva os núcleos para fora da saturação alternadamente num ciclo, resultando num aumento abrupto do valor da indutância, devido a elevação da permeabilidade magnética do núcleo, o que consequentemente, aumenta o valor da impedância do LCS, reduzindo a corrente de CC.

É de salientar que o elemento SAT nestes limitadores não perde o estado supercondutor, o que faz com que a sua recuperação após uma falha seja quase imediata. Estes têm a vantagem de em situações de falha interna não afectarem o funcionamento normal da linha, reduzindo os custos associados à indisponibilidade da rede. Apesar da quantidade de material SAT utilizado neste dispositivo ser menor e do sistema criogénico ser também de menor tamanho, este apresenta um volume considerável devido ao núcleo de ferro.

São conhecidas topologias de núcleos saturados, tais como, o LCS de indutância saturável, o limitador tipo interruptor controlado magneticamente, o LCS de núcleos saturados melhorado por desacoplamento magnético e o de núcleo saturado aberto referidos nas bibliografias citadas em (Vilhena, 2012).

2.2.3.3 Outros limitadores indutivos

Dentro do grupo de limitadores indutivos existem algumas topologias menos estudadas e/ou desenvolvidas, seja devido ao custo que advém da sua aplicação ou o seu desempenho real, as quais são apresentadas a seguir.

Híbrido

LCS híbridos, são aqueles que resultam da combinação de vários elementos de limitação, tais como fusíveis, interruptores, transformadores, assim como outros limitadores supercondutores. O caso a referir aqui, é o que resulta da mistura do limitador indutivo com o resistivo, como ilustra a Figura 2.11. Neste LCS, a limitação das correntes de CC é realizada através dos elementos SAT, que transitam do estado supercondutor para o estado normal incrementando a resistência do limitador. Por outro lado o transformador é encarregado de realizar a ligação magnética dos SAT à linha.

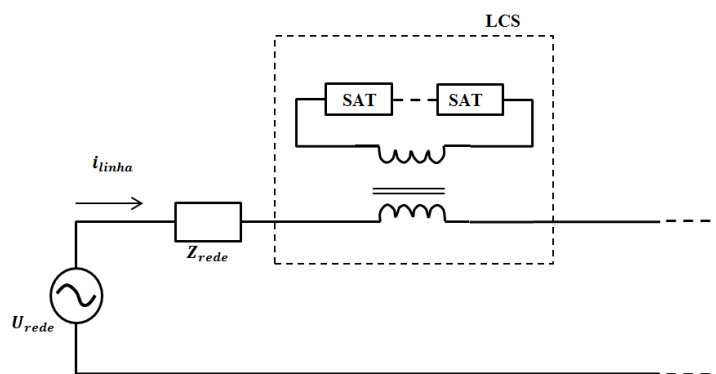


Figura 2.11: Esquema elétrico de um LCS Híbrido. Adaptado de (Silva, 2013).

Captura de Fluxo, “Flux-Lock Type”

O limitador de captura de fluxo é composto por um núcleo de ferro, um elemento SAT e duas bobinas que se encontram magneticamente ligadas, como está representado esquematicamente na Figura 2.12.

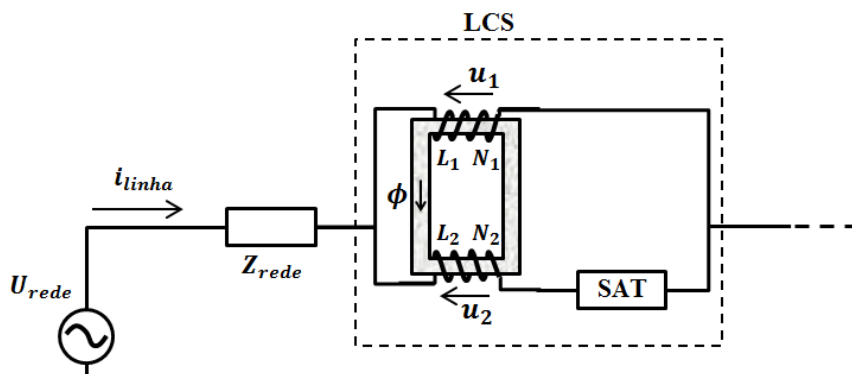


Figura 2.12: Esquema elétrico de um LCS de captura de fluxo. Adaptado de (Silva, 2013).

Esta montagem apresenta o elemento SAT em série com a segunda bobina, e o conjunto está em paralelo com a bobina primária, criando as bobinas fluxos de sentidos opostos. Este circuito em condições normais de funcionamento não apresenta variação de fluxo, e portanto não existe variação de tensão, ou seja, as tensões das bobinas são iguais, verificando-se uma captura do fluxo num modo DC. Logo, nestas condições, o limitador é transparente à rede, pois só o fluxo de dispersão é contabilizado para a impedância.

Perante uma situação de falha, a igualdade nas quedas de tensão não se cumpre, pois o SAT perde a supercondutividade introduzindo assim resistência. Gera-se então, uma variação no fluxo magnético, que induz tensões nas bobinas, das quais resultam impedâncias que vão limitar o valor da corrente. Uma vantagem deste limitador é a possibilidade de variar o nível de limitação através da variação da indutância das bobinas, isto é, variando o número de espiras.

Algumas das referências bibliográficas que abordam as configurações alternativas destes limitadores são (Han, Choi, Lim, & Lee, 2007), (Lim, Choi, & Han, 2004), (Lim, Kang, Choi, Lee, & Han, 2003), (Matsumura, Uchii, & Yokomizu, 1997) e (Matsumura, Uchii, & Yokomizu, 1999).

Limitador indutivo com núcleo de ar

Este tipo de limitadores tem como princípio de funcionamento, a utilização de núcleo de ar em lugar de ferro, e podem ser encontrados como variante ao de captura de fluxo. As topologias mais usuais contêm duas bobinas concêntricas, sendo a segunda de material SAT, e que mantêm a condição de ter fluxos opostos em funcionamento normal. Em situação de falha, a segunda bobina perde o estado supercondutor, gerando a impedância responsável pela limitação da corrente.

Algumas referências que podem ser consultadas sobre estes dispositivos são (Hatta, Nitta, Shirai, & Fujikawa, 2002) e (Matsumura, Kimura, Shimizu, Yokomizu, & Goto, 2003).

2.2.4 Limitadores Rectificadores

De uma forma geral, os limitadores rectificadores, são compostos por uma ponte rectificadora, uma fonte de tensão DC e um enrolamento SAT. O elemento SAT encarregado pela limitação da corrente, mantém em todo o seu funcionamento o estado supercondutor. Os modelos estudados destes LCS, variam conforme seja modificado o núcleo, a polarização e/ou o controlo da ponte rectificadora.

A partir da fonte de tensão DC, vai ser criada uma corrente DC, que em funcionamento normal vai ter um valor superior ao da corrente na linha, mantendo todos os elementos da ponte em condução, podendo então ignorar-se o valor da indutância do elemento supercondutor. Logo, verifica-se que nestas condições o limitador apresenta uma impedância baixa, contribuindo para esta somente as perdas relacionadas com a electrónica de potência, logo o LCS é invisível à rede.

Em presença de falha, a corrente da linha supera o valor da corrente imposta pela fonte, logo os elementos da ponte passam a estar ao corte, dependendo do meio ciclo em que a falha aconteceu, ou seja, o par D_3 e D_4 no meio ciclo positivo e o D_1 e D_2 no meio ciclo negativo. Perante esta situação, a corrente é limitada pelo enrolamento SAT. Esta topologia de LCS está representada na Figura 2.13.

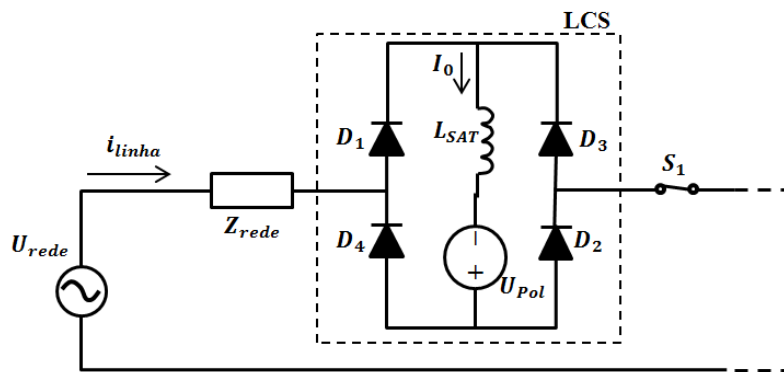


Figura 2.13: Esquema eléctrico de um LCS rectificador, tipo ponte rectificadora. Adaptado de (Saraiva, 2011).

Estes limitadores rectificadores podem ser controlados, sempre que sejam utilizados em lugar de díodos, tirístores, e o controlo é feito a partir dos ângulos de disparo destes. Conclui-se que teoricamente estes poderiam ser construídos sem elementos supercondutores, mas as dimensões da bobina necessária seria muito maior, elevando as perdas. Uma vantagem que se verifica neste dispositivo é que em nenhum momento do seu funcionamento existem mudanças de estado no SAT, logo não existe uma rápida degradação do material, observando-se uma rápida recuperação no

limitador após uma falha. Têm como desvantagem que para alta tensão (AT), os elementos de potência apresentam perdas significativas e podem danificar-se.

2.2.5 Conclusão

Estudou-se nesta secção, os diferentes modelos de limitadores que utilizam materiais supercondutores na sua composição, indicando-se de algumas vantagens da sua aplicação nas redes de energia. Foram descritas sumariamente as principais classes de LCS.

Os LCS resistivos, constituem os modelos mais simples e rápidos de limitadores, visto que o SAT encontra-se em série com a linha. Estes apresentam algumas desvantagens, tal como, a falta de homogeneidade no amortecimento que pode resultar na danificação, e até na destruição do material SC. Além disso, os custos económicos podem disparar, se for necessário um valor de resistividade elevado na limitação, visto que seria preciso nessa situação, ligar vários elementos em série e/ou ter materiais supercondutores de maior comprimento.

Os LCS indutivos, são menos degradáveis que os resistivos, pois os pontos quentes são mais facilmente retirados e os SAT não se encontram directamente ligados à rede de energia, o que evita o amortecimento. Nestes dispositivos pode ser ajustado o valor de corrente a limitar por meio da variação do número de espiras dos enrolamentos primários. Algumas topologias não apresentam mudança de estado no SAT, pelo que não existe necessidade de recuperação após uma falha. Têm como desvantagem o significativo peso e volume, devido aos núcleos de ferro, assim como a impossibilidade de serem utilizados em redes DC.

Os LCS rectificadores são limitadores que apresentam muito menos perdas AC que os dois anteriormente referidos. Isto deve-se ao facto do material SAT se encontrar sempre no estado superconductor, minimizando o aparecimento dos chamados pontos quentes, “*hot spots*”. Os elementos semicondutores utilizados nas pontes introduzem algumas perdas que podem ser significativas para AT.

2.3 Esforços Electromecânicos

2.3.1 Introdução

“Os enrolamentos são elementos que têm como propósito criar campo magnético quando são percorridos por uma corrente eléctrica ou produzir quedas de tensões entre dois pontos quando postos num campo magnético variante ou quando deslocados num campo magnético.” (Electropedia)

Partindo desta definição, podem-se retirar inúmeras aplicações para estes elementos, sendo o fabrico de motores e geradores eléctricos, transformadores de tensão e limitadores de corrente, as mais conhecidas na indústria energética.

De um modo geral estes equipamentos encontram-se submetidos a grandes esforços, de origem mecânica, tais como, trações, flexões, compressões e torção, e os seus efeitos são variáveis dependendo fundamentalmente das características dos materiais utilizados no seu fabrico. Outros esforços aos quais podem estar sujeitos os enrolamentos, são os de origem electromagnética. Da

combinação destas grandes áreas de estudo sobre esforços, pode-se concluir que os enrolamentos de motores, geradores, transformadores e limitadores são afectados por esforços electromecânicos.

Nas aplicações existentes para os enrolamentos, não é muito comum existirem falhas devido a esforços de origem puramente mecânica, no entanto verifica-se um elevado número de falhas devido a forças electromagnéticas que induzem tensões mecânicas nas bobinas.

São vários os cenários a ter em conta no estudo destes esforços, já que existem diferentes efeitos consoante as forças sejam entre as espiras de um enrolamento, entre dois enrolamentos distintos concêntricos ou numa outra disposição. Os esforços vão variar também em função do tempo e da intensidade das correntes que atravessam os enrolamentos. O tempo de vida do dispositivo também tem influência nos efeitos das falhas.

Junto à evolução do actual sistema energético, tem vindo a aumentar a bibliografia sobre equipamentos de inquestionável importância como os transformadores e limitadores de corrente. Contudo, o estudo dos esforços a que estão submetidos os enrolamentos destes dispositivos constitui uma pequena parte da totalidade da informação existente.

Inicialmente, o aparecimento e desenvolvimento de transformadores, somado à representação dada por Lorentz da teoria electrodinâmica, gerou uma preocupação internacional para verificar as forças presentes nestes dispositivos, as suas origens e as suas consequências, de modo a elevar a qualidade dos mesmos. O posterior aumento da carga nas redes eléctricas, que tem impulsionado projectos que utilizam elementos supercondutores, fez com que a necessidade de garantir a protecção dos dispositivos seja fundamental. Esta protecção pode ser obtida de dimensionar os dispositivos por forma a garantir que não são danificados pelos esforços aplicados aos enrolamentos perante correntes de curto-circuito.

Nos primeiros manuais de dimensionamento e construção de transformadores, referidos nesta dissertação por transformadores convencionais (TC), e que datam dos anos 40 do século passado, encontram-se estudos das principais forças desenvolvidas, sendo identificadas as suas componentes e os seus efeitos. No entanto, só nas últimas décadas do século XX, é que são consolidadas as técnicas e métodos analíticos de cálculo dos esforços nos enrolamentos.

Actualmente existem artigos que abordam essas metodologias aplicadas a transformadores e limitadores supercondutores, mas sendo estas tecnologias ainda não muito exploradas, o conteúdo bibliográfico é reduzido comparativamente ao dos transformadores convencionais.

São objectivo deste capítulo, a apresentação dos conceitos fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

2.3.2 Esforços Electrodinâmicos em Enrolamentos

2.3.2.1 Considerações Iniciais

O fabrico de transformadores tem sido aperfeiçoado com o decorrer dos anos, mas o aumento dos consumos, e o conseqüente incremento das probabilidades de surgirem correntes de CC, levam a querer elevar a vida útil destes equipamentos. Ao serem produzidos, eles apresentam rigidez dieléctrica, térmica, mecânica e química suficiente para a aplicação a que se destinam. Mas a

degradação é inevitável com o decorrer do tempo, resultante essencialmente das vibrações durante o seu funcionamento, dos processos electroquímicos e das deformações nos enrolamentos devidas às correntes de curto-circuito elevadas.

No dimensionamento dos enrolamentos de transformadores, são considerados todos esses fenómenos, esperando que suportem um certo número mínimo de ocorrências dos mesmos. Contudo, cada evento vai encurtar o tempo de vida útil, daí a necessidade de realizar periodicamente revisão e manutenção dos componentes do dispositivo. A avaliação das condições mecânicas dos enrolamentos dos transformadores constitui ainda uma temática que não apresenta um número significativo de metodologias infalíveis, sendo esta secção dedicada ao levantamento da bibliografia existente.

2.3.2.2 Origem das falhas

Com o objectivo de contabilizar os custos associados às falhas têm-se realizado pesquisas de carácter económico, como a apresentada em (Bartley, 2003), com a participação de empresas de todo o mundo, identificando-se que os maiores prejuízos económicos são causados por defeitos e danos nos enrolamentos dos transformadores.

Sendo os enrolamentos parte activa no funcionamento dos transformadores, são vários os artigos que os colocam na origem das falhas, associados a causas internas e/ou externas. A Figura 2.14, mostra uma árvore com as causas mais comuns de falhas nos enrolamentos.

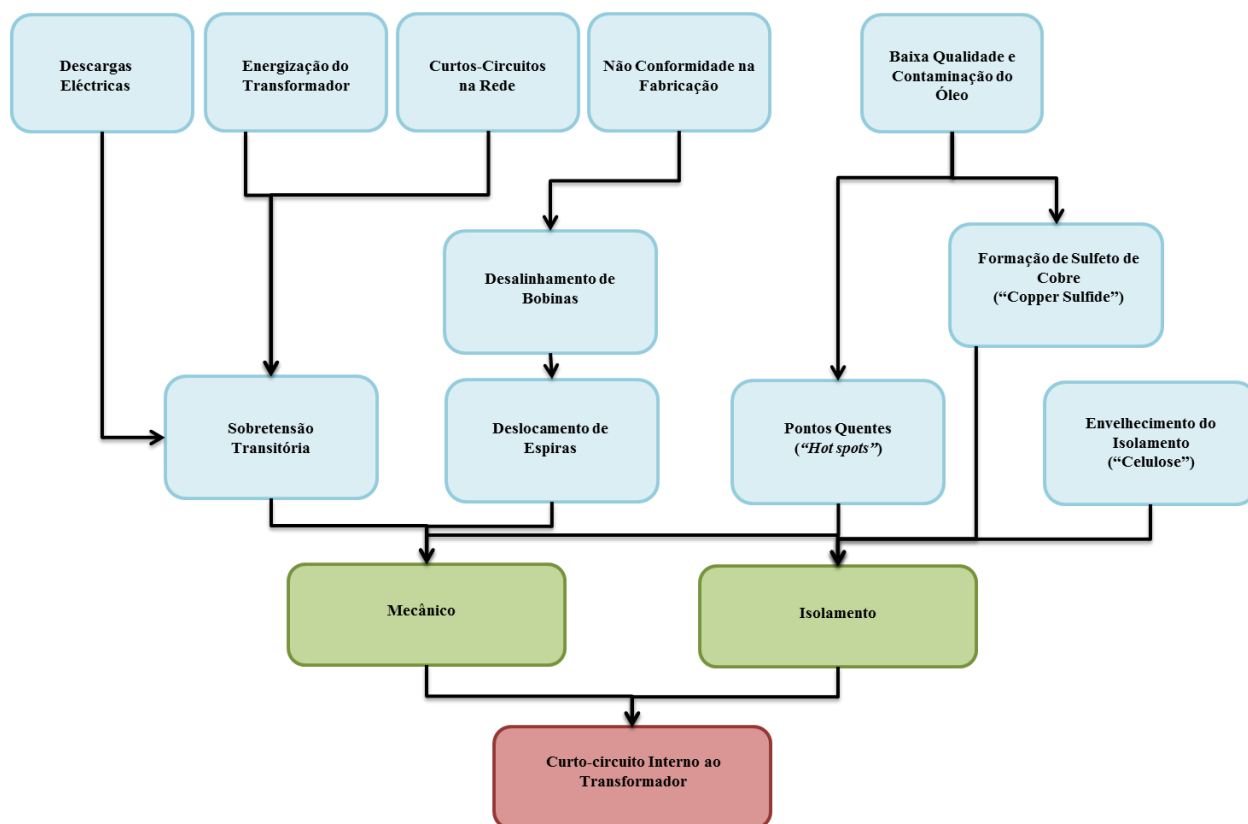


Figura 2.14: Árvore de falha dos enrolamentos. Adaptado de (Franzén & Karlsson, 2007).

O principal factor que é identificado como ameaça para a integridade mecânica dos enrolamentos do transformador, é a deformação dos mesmos, influenciada principalmente pelo aparecimento de correntes de curto-circuito e/ou correntes transitória de ligação, “*inrush*”, a vermelho.

Essas correntes podem surgir de diversas situações, como ilustram os quadrados azuis, provocando falhas mecânicas ou de isolamento, indicadas a verde.

O conhecimento dos comportamentos e metodologias de cálculo das correntes de curto-circuito e das correntes “*inrush*”, é imprescindível no dimensionamento de transformadores, propiciando assim, a previsão do comportamento dos mesmos ante esforços provocados por estas grandezas. O impacto que têm nos enrolamentos são de natureza térmica e/ou mecânica, pelo que representam factores determinantes nos limites operacionais dos equipamentos. Alguns estudos mais aprofundados sobre a temática identificam os tipos de CC existentes e apresentam formulações e metodologias de cálculo. (Ferreira, 2013).

Sendo uma ciência exacta a predição do número de falhas que pode experimentar um transformador durante a sua vida activa, descreve-se de forma geral no artigo, (Wang, Vandermaar, & Srivastava, 2002), a chamada curva “*bathtub*”, que modela a característica de ocorrência de falhas na vida útil dos transformadores, ilustrada na Figura 2.15, dividida em três áreas relevantes. A primeira constituída pelos anos iniciais do funcionamento nos quais são observados possíveis defeitos de dimensionamento e/ou construção, assim como danos feitos no transporte ou na montagem. Uma segunda, com baixa e quase constante percentagem de falhas, ocorrendo normalmente aleatoriamente. Esta afirmação não é verdadeira para todos os sistemas de potência, verificando-se em alguns que só se cumpre se existir boa qualidade na manutenção preventiva do equipamento. Finalmente a terceira zona, é onde a degradação do transformador leva ao aumento da taxa de falhas, encontrando-se como causa principal, a perda da resistência mecânica aos esforços.

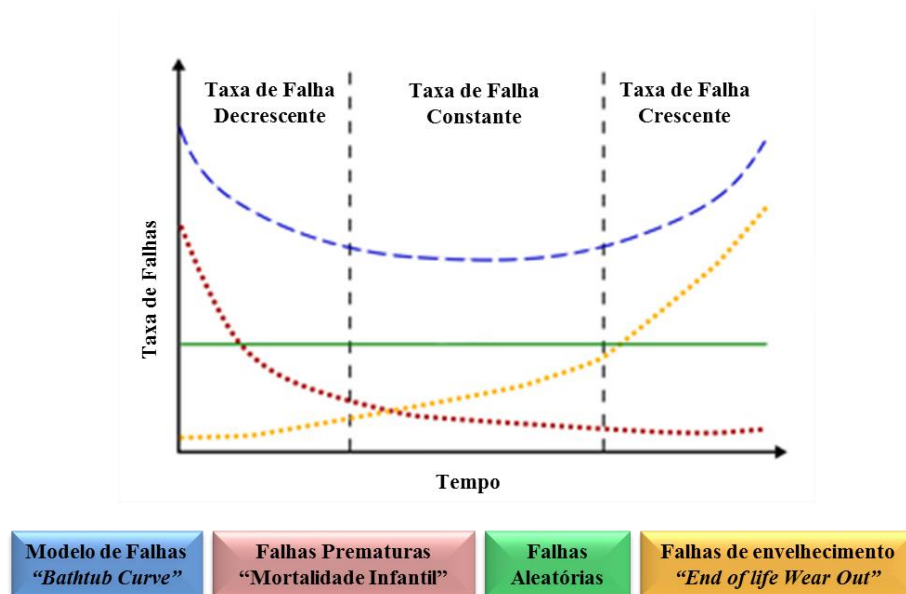


Figura 2.15: Modelo de falhas em transformadores, “*Bathtub*”. (Wikipedia)

Sobre a origem das falhas em transformadores de potência, existe um número significativo de estudos, nomeadamente (Bartley, 2003) e (CIGRE, 1983), que têm como principal objectivo elevar a compreensão dos fenómenos que tantos prejuízos provocam no mercado energético actual.

2.3.3 Forças electrodinâmicas em enrolamentos convencionais

2.3.3.1 Caracterização das forças electrodinâmicas

Os estudos realizados sobre forças electrodinâmicas em enrolamentos de transformadores, demonstram que os esforços de maior relevância são os de origem electromagnética. Estes esforços são descritos sucintamente na teoria electrodinâmica, como sendo a densidade de força num determinado volume de bobina, igual ao produto vectorial da densidade de corrente na bobina pela densidade de fluxo de dispersão. Existe um conjunto de equações relacionadas entre si, que representam esta teoria, sendo (2.1), a expressão básica das forças, estabelecida por Lorentz, isto é:

$$\vec{f} = \vec{J} \times \vec{B} \quad (2.1)$$

Numa observação simples dos fenómenos electromagnéticos presentes nos enrolamentos dos transformadores, verifica-se em qualquer regime de funcionamento, que o efeito das forças existentes entre as espiras de uma bobina é de atracção, isto deve-se a que todas as espiras são percorridas por correntes no mesmo sentido. Para duas bobinas diferentes o efeito das forças depende do sentido das correntes que as percorrem, obtendo-se forças de repulsão para correntes de sentidos contrários.

É de salientar que em condições normais de funcionamento estas forças não representam ameaça para a integridade do equipamento, pois este deve estar dimensionado para suportar tais esforços. Já em situações em que existem elevadas correntes a percorrer o dispositivo, verificam-se campos de dispersão capazes de originar esforços com valores suficientemente altos, permitindo-lhe danificar os enrolamentos do transformador.

De análises realizadas sobre o comportamento do campo magnético de dispersão, em diferentes condições (Azevedo, 2007), conclui-se que a distribuição do fluxo de dispersão depende da topologia, conformidade do núcleo e enrolamentos, assim como da direcção, do sentido e da amplitude da corrente envolvida. Também, que os processos magnéticos que ocorrem no transformador verificam que quando existem correntes a circular nas duas bobinas, a maior parte do fluxo que passa pelo ar vai concatenar o enrolamento que apresente um valor de força magnetomotriz (fmm) mais elevado.

Forças Radiais e Axiais

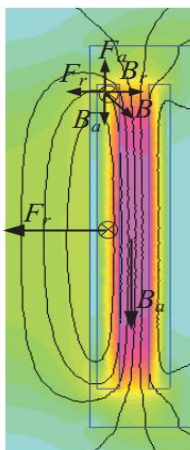


Figura 2.16: Campos de indução o densidades de fluxo magnético de dispersão, forças radiais e axiais na janela de um transformador de enrolamentos concêntricos. Retirado de (Azevedo, 2007).

Na Figura 2.16 ilustra-se, a distribuição do fluxo, assim como o comportamento geral dos campos de indução de dispersão radial e axial, que originam os sentidos das forças indicados. Os parâmetros e respectivos sentidos, indicados anteriormente, representam os aspectos usualmente encontrados nos estudos de transformadores com enrolamentos concêntricos e forças magnetomotrizes uniformemente distribuídas.

Observa-se que a distribuição de densidade de fluxo magnético de dispersão é maioritariamente axial ao longo da altura dos enrolamentos, B_a . No entanto, nos extremos dos enrolamentos existe uma decomposição do campo de indução de dispersão em duas componentes, uma axial (B_a) e uma radial, B_r .

Com base na expressão (2.1), pode-se retirar que da interacção dos campos de dispersão axial e radial, com as correntes presentes nos enrolamentos, surgem as forças radiais (F_r) e axiais (F_a), respectivamente. As consequências destas forças vão ser diferentes, consoante o tipo de montagem e da intensidade das correntes envolvidas, sendo algumas destas mostradas com mais detalhe na secção 2.3.4.

São factor determinante na variação da magnitude dos esforços, alguns parâmetros construtivos como o tipo de núcleo e as suas propriedades magnéticas, o tipo de enrolamento e a disposição das bobinas no transformador. No caso de existir algum desequilíbrio e/ou desalinhamento entre os enrolamentos, indica-se em alguns estudos, (Azevedo, 2007) (Junior, 2010) (Minhas, 2007), que as forças axiais são incrementadas e tendem a aumentar ainda mais estes defeitos, que, por sua vez, reforçam os esforços a que os enrolamentos vão estar submetidos.

Segundo as referências citadas anteriormente, em enrolamentos concêntricos, as forças radiais são geralmente responsáveis pela repulsão entre os enrolamentos, e não representam grande ameaça, para a integridade do transformador, no entanto devem ser contabilizadas sempre que existir alguma assimetria na construção do transformador. Este tipo de forças também gera efeitos no enrolamento interno diferentes do externo como, por exemplo, tensões de compressão e de tracção, respectivamente, como representado na Figura 2.17. Por outro lado as forças axiais, são as responsáveis pelo maior número de danos nos transformadores, uma vez que geram esforços de compressão axial. A intensidade destas forças está esquematizada no gráfico da Figura 2.18.

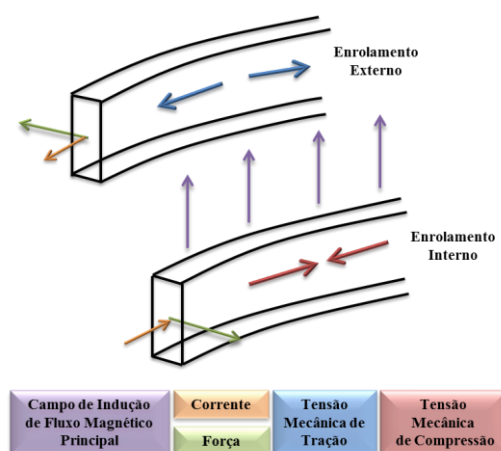


Figura 2.17: Direção das forças e tensões no condutor. Adaptado de (Mahomed, 2011).

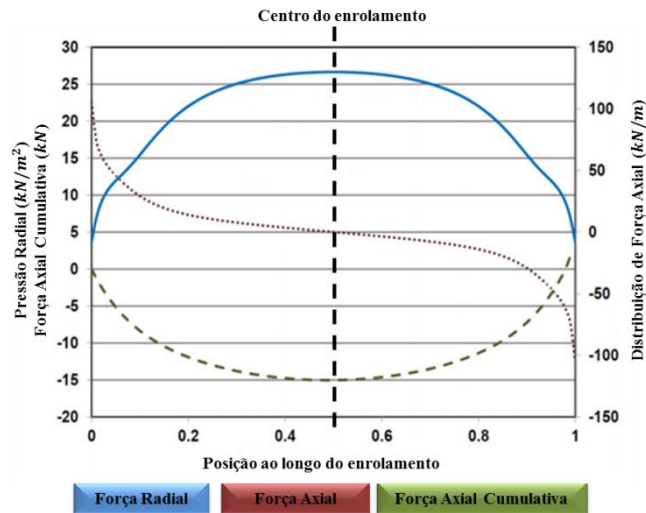


Figura 2.18: Forças electromagnéticas num transformador convencional sob curto-circuito. Adaptado de (Cabanés Aracil, Lopez-Roldan, Coetzee, Darmann, & Tang, 2012).

Para outras disposições dos enrolamentos em transformadores não se tem estudado com muito detalhe as características, direcção, sentidos e efeitos, das forças axiais e radiais, mas verifica-se que os princípios electrodinâmicos estão presentes em todas as topologias.

2.3.3.2 Metodologia analítica para o cálculo das forças radiais nos enrolamentos

Vários autores referenciam a possibilidade de estimar o valor das forças radiais tanto com métodos simples como com modelos computacionais mais complexos. Entre os mais elementares, estão os utilizados em (Azevedo, 2007) (Junior, 2010) (Minhas, 2007), alguns dos quais foram propostos inicialmente em (Waters, 1966) e que têm sido centro de análise com o incentivo de eliminar imprecisões. Já na actualidade são utilizados métodos computacionais que têm como base imagens bidimensionais (2D) e tridimensionais (3D), como o método dos elementos finitos.

Encontra-se representado na Figura 2.19 uma perspectiva geral, dos enrolamentos concêntricos de um transformador, e de onde parte a análise realizada para o cálculo das forças radiais. A obtenção do valor destas forças não considera as componentes que surgem nos extremos dos enrolamentos, onde ocorre a decomposição das linhas de fluxo de dispersão, visto que estes esforços são inferiores nesses pontos e que o valor de força radial mais elevado encontra-se no ponto médio do enrolamento.

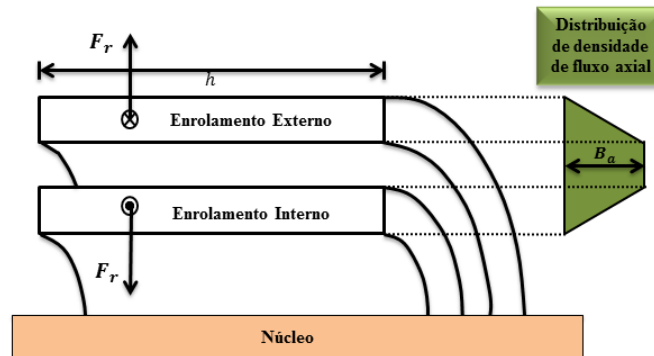


Figura 2.19: Secção transversal dos enrolamentos de um transformador, distribuição de campo de indução axial e forças radiais. Adaptado de (Azevedo, Delaiba, Oliveira, Carvalho, & Bronzeado, 2007).

Ilustra-se na figura anteriormente referida, os sentidos das forças radiais resultantes da interacção das correntes com os campos axiais nos quais estão mergulhados os enrolamentos. É aproximado o campo de indução de dispersão axial a um trapézio, pelo que o valor da densidade entre os enrolamentos mantém-se constante e aumenta à medida que existe uma aproximação da face interna do enrolamento externo e da face externa do enrolamento interno, facilitando assim as formulações e cálculos consequentes.

A expressão da força electrodinâmica dF dada por.

$$dF = B \cdot I \cdot dl \cdot \sin\theta \quad (2.2)$$

Sendo $l = \pi D_m$ o comprimento de uma espira com diâmetro médio D_m e $\theta = 90^\circ$ é o ângulo entre os vectores \vec{B} e \vec{dl} .

Pode ser reescrita como (2.3), que permite obter o valor da força num enrolamento de n espiras.

$$F = B \cdot nI \cdot \pi D_m \text{ [N]} \quad (2.3)$$

Da situação representada na Figura 2.19 pode obter-se o valor da densidade de fluxo de dispersão axial (B_a) existente no ponto médio entre os enrolamentos. Para tal considera-se o campo como sendo invariante ao longo do caminho, ou seja, o campo é uniforme na maior parte do comprimento dos enrolamentos, e sendo (μ_0) a permeabilidade magnética do vácuo, (h) a altura do enrolamento e (nI) a força magnetomotriz, obtém-se a expressão.

$$B_a = \mu_0 \frac{nI}{h} \text{ [T]} \quad (2.4)$$

Devido a ambos os enrolamentos se encontrarem envolvidos pelo valor médio de densidade de fluxo ($\frac{1}{2} B_a$), e usando (2.4), a força radial toma a forma:

$$F_r = \frac{1}{2} \mu_0 \frac{nI}{h} \cdot nI \cdot \pi D_m = \frac{2\pi^2 (nI)^2 D_m}{h} 10^{-7} \text{ [N]} \quad (2.5)$$

Finalmente pode-se observar na Figura 2.20, que o enrolamento externo experimenta forças radiais que tendem a expandi-lo (tensão de tração) e o enrolamento interno forças radiais que o comprimem (tensão de compressão). Estes efeitos serão abordados com mais detalhe na secção 2.3.4.1.

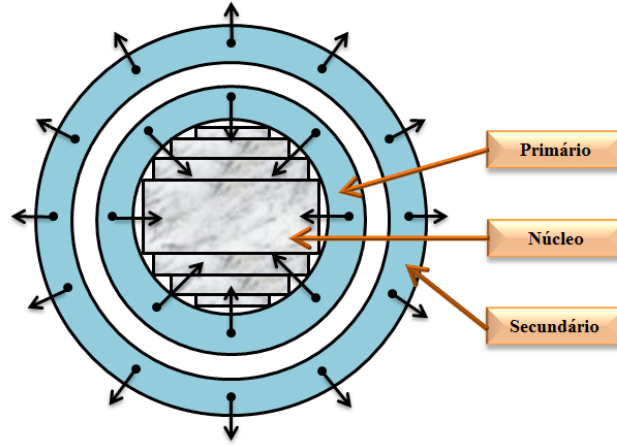


Figura 2.20: Forças de tração e compressão nos enrolamentos externo e internos, respectivamente. Adaptado de (Azevedo, 2007).

Enrolamento externo

O enrolamento externo vai sentir com mais intensidade o efeito das forças radiais nos condutores mais próximos do diâmetro interno. Por razões de construção, isto é, para que os condutores fiquem firmemente fixados, faz sentido considerar que o valor médio da força radial ocorre no diâmetro médio deste enrolamento, visto que as forças sofrem a mesma diminuição linear que o campo de dispersão e que deve existir uma transferência de força entre os condutores.

Para a obtenção da força média ($F_{rmédio}$), considera-se que esta equivale à pressão exercida no diâmetro do enrolamento, deve ter-se em atenção que esta força na realidade não é aplicada no interior do enrolamento. Com base na hipótese de que a força radial total é equivalente à pressão exercida sobre a circunferência de comprimento (l), obtém-se a expressão.

$$F_{rmédio} = \frac{2\pi(nl)^2 D_m}{h} 10^{-7} [\text{N}] \quad (2.6)$$

Além da força média, e considerando a secção transversal das espiras (S_e) e o número de espiras da bobina estudada, obtém-se a tensão de tração média no enrolamento representado, que é dada por:

$$\sigma_{médio} = \frac{F_{rmédio}}{n \cdot S_e} = \frac{\pi(nl)^2 D_m}{h \cdot n \cdot S_e} 10^{-7} [\text{N/m}^2] \quad (2.7)$$

O parâmetro anterior pode ser reescrito de varias formas, que dependem do factor de assimetria do primeiro pico de corrente, da resistência em corrente continua e da resistividade do material condutor.

Enrolamento interno

Parte-se do pressuposto de que as expressões obtidas para a bobina externa são aplicáveis nas bobinas internas e considera-se ainda outros tipos de deformações, como são os chamados “*free buckling*” e “*forced buckling*”.

“Free buckling”, são as deformações em enrolamentos que não apresentam estruturas de sustentação axial, cujo valor crítico pode ser obtido pela expressão (2.8), onde (E) é o módulo da elasticidade do material e (e) é a espessura do condutor.

$$\sigma_{el} = \frac{E \cdot e^2}{D_m^2} \text{ [N/m}^2\text{]} \quad (2.8)$$

“Forced buckling”, são as deformações em que os enrolamentos apresentam estruturas de sustentação axial, e cujo valor crítico é obtido pela expressão (2.9), onde ($E(\delta)$) representa o módulo da elasticidade incremental no valor crítico, (x) é a constante para espessura equivalente fornecida pelo fabricante e (Esp_{axial}) expressa a quantidade de suportes axiais presentes no modelo.

$$\sigma_{ef} = \frac{E(\delta) \cdot (x \cdot e^2) \cdot Esp_{axial}^2}{12 \cdot D_m^2} \text{ [N/m}^2\text{]} \quad (2.9)$$

2.3.3.3 Metodologia analítica para o cálculo das forças axiais nos enrolamentos

Com base nos trabalhos encontrados, pode dizer-se que não existe um método exacto de obtenção desta força, se bem que alguns dos fornecidos podem ser simples e apresentar alguma precisão, a obtenção de maior exactidão só é possível com apoio de métodos complexos computacionais.

Inicialmente ante a impossibilidade de utilizar métodos computacionais de maior exactidão, foram realizadas considerações que permitiam obter resultados de baixo nível de precisão como por exemplo, ignorar o efeito dos esforços na curvatura (Azevedo, 2007) (Junior, 2010). Este efeito, assim como outros fenómenos electrodinâmicos à volta dos enrolamentos, são já tidos em conta nos actuais modelos.

2.3.3.3.1 Método ampère-espira residual

Este é um dos métodos mais antigos, e com bom grau de precisão, utilizado no cálculo das forças axiais dos enrolamentos, sendo detalhadamente explicado para diferentes situações em (Azevedo, 2007) (Junior, 2010) (Minhas, 2007).

Tem como princípio que, qualquer arranjo de enrolamentos concêntricos, com somatório das forças magnetomotrices nulo, pode ser dividido em dois grupos de ampère-espira (f.m.m) balanceados, um que produz campo axial e outro campo radial. Os f.m.m que actuam radialmente são responsáveis pelo aparecimento de fluxo radial e consequentes forças axiais.

As f.m.m radiais que actuam num determinado ponto dos enrolamentos, são calculados a partir da soma algebraica das f.m.m do primário e secundário existentes entre esse ponto e a extremidade do enrolamento. A curva resultante da representação de todos os pontos constitui um diagrama dos ampères-espiras residuais, também conhecido como ampère-espira desequilibrado. Salienta-se que em condições ideais, ou seja, sem derivações e/ou desequilíbrios, não existem estes resíduos nos ampères-espiras nem forças entre os enrolamentos, mas sim forças de compressão interna e forças nas terminações das bobinas.

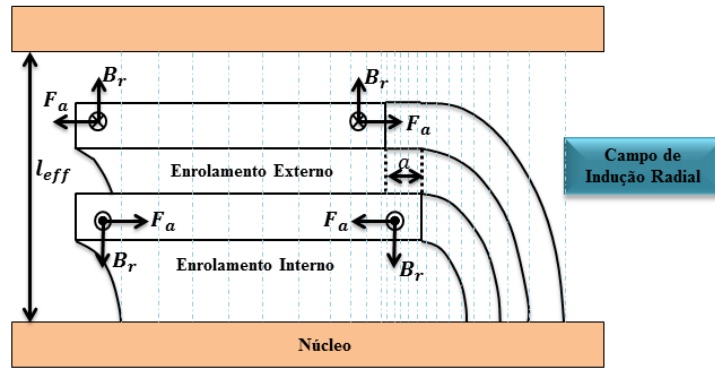


Figura 2.21: Secção transversal dos enrolamentos de um transformador, densidade de fluxo de dispersão radial e forças axiais. Adaptado de (Azevedo, Delaiba, Oliveira, Carvalho, & Bronzeado, 2007).

A distribuição dos f.m.m radiais é determinada com base na Figura 2.21 e Figura 2.22 a), representando um conjunto de enrolamentos concêntricos com uma derivação de comprimento (a) no extremo de uma das bobinas. As duas componentes seguintes, I e II da Figura 2.22 b), constituem grupos de f.m.m balanceados que conduzem à configuração inicial quando sobrepostos. Finalmente, encontra-se à direita, o diagrama dos ampères-espiras radiais em função do comprimento dos enrolamentos, o qual toma a forma de um triângulo com máximo igual a $a(nI_{max})$, Figura 2.22 c), onde (nI_{max}) é a força magnetomotriz da bobina interna ou da externa.

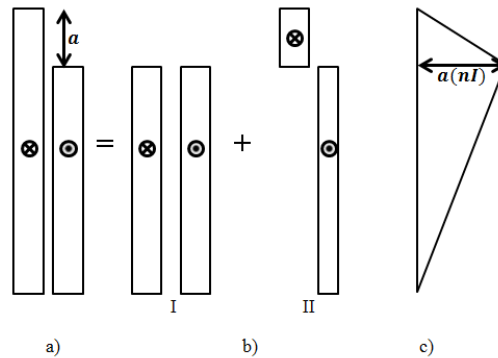


Figura 2.22: Diagrama de f.m.m residuais de enrolamentos com derivação. Adaptado de (Azevedo, 2007) (Junior, 2010) (Minhas, 2007).

Na obtenção das forças axiais é preciso conhecer o fluxo radial produzido pela f.m.m radial, isto é, ter noção do comprimento efectivo do caminho percorrido pelo fluxo radial para todos os pontos ao longo do enrolamento. Neste procedimento os autores assumem que o comprimento em questão é constante, ou seja, não varia com a posição axial no enrolamento.

Encontra-se em 2.10, a expressão da densidade de fluxo radial média no diâmetro médio (B_r), onde (l_{eff}) é o comprimento do caminho efectivo e $\frac{1}{2}a(nI_{max})$ constitui o valor médio da f.m.m radial.

$$B_r = \mu_0 \frac{a(nI_{max})}{2l_{eff}} \text{ [T]} \quad (2.10)$$

Consequentemente 2.11 representa o valor da força axial no enrolamento de f.m.m igual a (nI) .

$$F_a = \frac{2\pi a(nI_{max})^2}{10^7} \cdot \frac{\pi D_m}{l_{eff}} \text{ [N]} \quad (2.11)$$

Verifica-se que podem ser analisadas outras situações de desequilíbrio (Figura 2.23 e Tabela 2.2), a partir do estudo da variação do termo $\Lambda = \frac{\pi D_m}{l_{eff}}$, chamado de coeficiente de permeância por unidade de comprimento axial, a qual é modificada em dependência das propriedades do núcleo, da proximidade do tanque, das dimensões dos enrolamentos e das dimensões dos arranjos de derivações, “tap’s”.

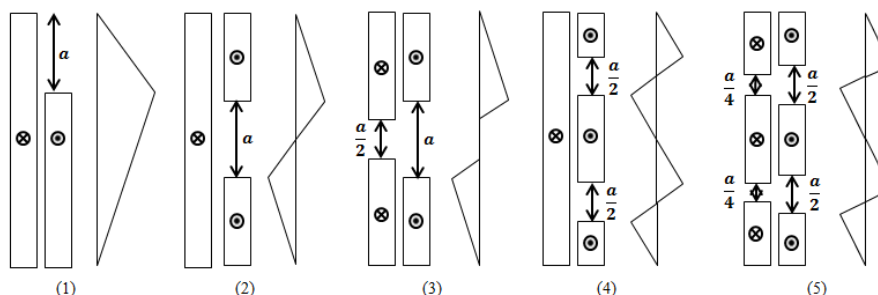


Figura 2.23: Diagrama de f.m.m residuais para cinco arranjos de derivações nos enrolamentos. Adaptado de (Junior, 2010).

Tabela 2.2: Expressões das forças axiais resultantes, para cada arranjo de derivação, e correspondente valor de Λ . Adaptado de (Junior, 2010).

| Arranjo de derivações “tap’s” | $F_a (N)$ | $\Lambda \left(\frac{\text{Altura da Janela}}{\text{Diâmetro do núcleo}} = 4.2 \right)$ | $\Lambda \left(\frac{\text{Altura da Janela}}{\text{Diâmetro do núcleo}} = 2.3 \right)$ |
|----------------------------------|---|--|--|
| Situação 1 | $\frac{2\pi a(nI_{max})^2}{10^7} \Lambda$ | 5.5 | 6.4 |
| Situação 2 | $\frac{\pi a(nI_{max})^2}{2 \times 10^7} \Lambda$ | 5.8 | 6.6 |
| Situação 3 | $\frac{\pi a(nI_{max})^2}{4 \left(1 - \frac{1}{2}a\right) \times 10^7} \Lambda$ | 5.8 | 6.6 |
| Situação 4 | $\frac{\pi a(nI_{max})^2}{8 \times 10^7} \Lambda$ | 6.0 | 6.8 |
| Situação 5 | $\frac{2\pi a(nI_{max})^2}{16 \left(1 - \frac{1}{2}a\right) \times 10^7} \Lambda$ | 6.0 | 6.8 |

A bibliografia realça que já que as maiores forças axiais ocorrem nas janelas dos transformadores, os trifásicos sofrem de um aumento da força de aproximadamente 25% em relação à força média, enquanto nos monofásicos é de 50%.

2.3.3.3.2 Método dos Elementos Finitos (MEF)

O método dos elementos finitos, é um método numérico que tem como objectivo a resolução de problemas definidos como sendo de domínio contínuo através de equações diferenciais e integrais. Assume, que o sistema em estudo pode ser representado por um conjunto de subdomínios mais simples, elementos finitos, após a transformação do problema com infinito grau de liberdade para um com um número finito de parâmetros desconhecidos, ou seja, com a realização de uma discretização.

O conjunto de elementos finitos que conformam o domínio em estudo é conhecido como *malha*, onde os elementos se encontram ligados entre eles por meio de pontos discretos chamados de *nós*. Atendendo à geometria e natureza do problema, assim como ao MEF, são obtidas soluções para as variáveis de campo dependentes em cada elemento, por meio de funções de interpolação. Com estas

funções, são obtidos os valores das variáveis de campo internas aos elementos, a partir do conjunto discreto de valores das incógnitas nodais.

O método em questão não é exacto, mas verifica que quanto mais elementos são utilizados na discretização, maior convergência vai existir para o problema contínuo. Quando utilizado na análise do electromagnetismo e/ou electromecânica, são calculadas grandezas como o potencial eléctrico ou o vector potencial magnético que permitem a obtenção dos respectivos campos e fluxos, e que por sua vez são a base da obtenção das formas de ondas da corrente e tensão, assim como dos valores das impedâncias, capacitâncias, reactâncias, perdas e forças, presentes no objecto de estudo.

Na origem da implementação computacional do MEF para o estudo de forças, encontra-se o método do tensor de Maxwell, o qual pode ser aplicado no cálculo de esforços em quase qualquer dispositivo, e tem origem nas equações de Maxwell. Este é um método independente de não linearidades, saturação, histerese ou mesmo das perdas que podem existir no equipamento, visto que não é imprescindível ter conhecimento da distribuição do campo em todas as suas partes (Nogueira, 2009).

De forma geral o método de elementos finitos tem como vantagens a possibilidade de discretização de domínios de geometrias complexas através de elementos de diversos tamanhos. Também tem a facilidade que aporta na modelização de problemas com domínios não homogéneos e descontinuidades nos materiais. São estas as principais razões que levaram à utilização deste método nesta dissertação.

2.3.3.3 Outros métodos

Na literatura são apresentados outros métodos de obtenção dos valores da força axial, os quais não são muito utilizados actualmente. Deles todos são apresentados aqui algumas.

Medição indirecta das forças axiais

São vários os trabalhos que referem medições indirectas das forças axiais, sem utilizar especificações muito restritas, resultando em valores “grosseiros”, mas que fornecem uma ideia geral dos esforços aos quais estão submetidos os enrolamentos em questão. Bibliografias tais como, (Minhas, 2007) (Waters, 1966), apresentam este processo.

Uma forma de medição das forças axiais totais em enrolamentos, foi desenvolvida pela Electrical Research Association (ERA). Nesta não é considerada a distribuição da força ao longo da circunferência do enrolamento, mas sim o valor máximo de força.

A relação volt por espira, pode constituir uma medida do fluxo axial, pelo que tem sido estudado em bobinas disco contínuo também conhecida de bobina em panqueca, único tipo de enrolamento onde é aplicado este método. Considera-se que se o valor de f.m.m por unidade de comprimento ($fmm(Ae/m)$) é constante num troço “ab”, Figura 2.24, a força axial total é dada pela equação (2.12), onde (dx) representa o comprimento diferencial axial do enrolamento. Nestas medições verifica-se que o fluxo axial num determinado ponto é proporcional aos volt por espiras induzidos nesse ponto, pelo que pode ser obtido o valor total de força desde que se conheçam os valores de volt por espira induzidos no enrolamento.

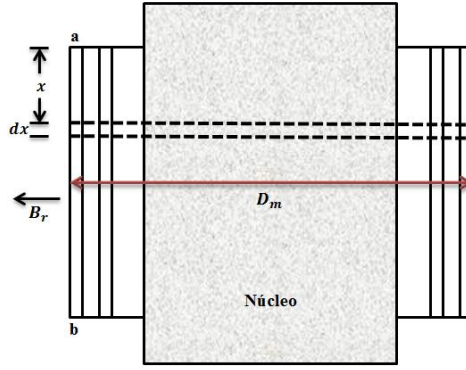


Figura 2.24: Método de cálculo do fluxo radial pela medição dos volt-espira. Adaptado de (Minhas, 2007).

$$F_{ab} = fmm(Ae/m) \cdot \pi \cdot D_m \int_a^b B_r dx \text{ [N]} \quad (2.12)$$

Outros métodos de cálculo das forças axiais tratados nas referidas literaturas, são os que resultam da medição das densidades de fluxo radial.

Métodos bidimensionais

Estas metodologias surgem depois de se ter verificado que métodos como o de ampère-espira residual proporcionam resultados satisfatórios para forças em enrolamentos que apresentam distribuição assimétrica de f.m.m, mas que não têm em conta as forças presentes nos enrolamentos uniformes inexplorados ou “*uniform untapped windings*”.

Apresentando como princípio a situação anterior, foi sugerido em (Waters, 1966), uma representação do enrolamento que simplifica o problema, a qual se ilustra na Figura 2.25. Consiste, num condutor recto bidimensional infinitamente longo, no qual as força num comprimento igual ao comprimento médio da espira, são considerados como representação do transformador.

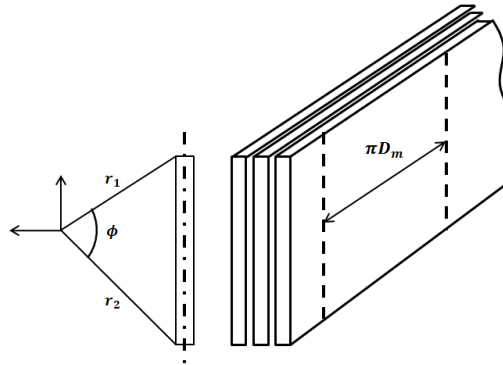


Figura 2.25: Representação da bobina como um condutor recto bidimensional infinitamente longo. Adaptado de (Minhas, 2007).

Assume-se neste método que as *f.m.m* encontram-se concentradas ao longo de uma linha no diâmetro médio da bobina. Assim sendo, verifica-se que a componente radial da densidade de fluxo é proporcional a $\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)$ e a axial, é proporcional ao ângulo (ϕ) subtendido nos extremos. Ao ser integrada a força axial entre dois pontos contíguos que ocupam todo o comprimento axial, obtém-se (2.13).

$$F_a = F \cdot \psi(k, d) \quad (2.13)$$

Onde,

$$F = \frac{2(nI_{max})^2}{10^{10}} \cdot \frac{\pi D_m}{l} \text{ [kN]} \quad (2.14)$$

E em que o diâmetro médio do transformador (D_m) e o comprimento do enrolamento em milímetros (mm). A expressão (2.15) definida por (Waters, 1966), representa então $\psi(k, d)$ como sendo função da fracção (k) do comprimento total do enrolamento que é ocupado por uma das porções contíguas e (d) a distância radial entre os centros dos enrolamentos, também expressas em fracção.

$$\psi(k, d) = \frac{k}{2} \ln \left(\frac{1+d^2}{k^2+d^2} \right) + \frac{1-k}{2} \ln \left(\frac{1+d^2}{(1-k)^2+d^2} \right) - d \left[\tan^{-1} \left(\frac{k}{d} \right) + \tan^{-1} \left(\frac{1-k}{d} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{1}{d} \right) \right] \quad (2.15)$$

O método descrito anteriormente, tem sido utilizado no estudo de situações mais complicadas, empregando como ferramentas de auxílio imagens radiais e axiais, assim como séries de Fourier.

Métodos Computacionais

Valores de esforços axiais com elevado grau de precisão não são facilmente alcançados com a utilização de métodos analíticos. Existe um significativo número de componentes de fluxo e força que são ignorados pelas metodologias anteriores, muitas associadas às configurações do núcleo e à disposição dos enrolamentos, visto que não podem ser expressas em equações rigorosas. Surge assim, um conjunto de métodos que se auxiliam de *softwares* computacionais para o cálculo, mas que continuam tendo como base alguns dos processos analíticos já referidos

Algumas das metodologias computacionais descritas em (Minhas, 2007), que apresentam razoável exactidão são as conhecidas por Smythe's Solution e Rabin's Solution. Para além, da chamada solução por computador analógico e do método das imagens com condutores discretos, descritas com mais detalhes na bibliografia (Minhas, 2007).

2.3.4 Consequências das falhas por esforços electromecânicos

O conhecimento dos efeitos nos enrolamentos, que advêm dos esforços electrodinâmicos aos quais são submetidos, tem elevado grau de importância no desenvolvimento de técnicas e metodologias que permitam detectar estas falhas antes da total degradação do transformador. Estes defeitos podem ter variadas origens que podem ser internas e/ou externas, como já abordado na secção 2.3.2.2, e tem uma estreita relação com as características físicas e construtivas do dispositivo em estudo, tipo de núcleo, enrolamentos e acessórios.

2.3.4.1 Efeitos das forças radiais

Como referido anteriormente, os enrolamentos dos transformadores de núcleo envolvido, ou seja, bobinas concêntricas, sofrem efeitos diferentes aquando o enrolamento seja o interno ou o externo. Verificando-se que os índices de resistência mecânica associados às bobinas interna e externa, dependem das estruturas de suporte dos condutores e da resistência à tracção dos condutores, respectivamente.

Perante forças radiais, é o enrolamento externo o que experimenta esforços de tracção, ou “*hoop stress*”, pelo que os condutores que o constituem devem ser dimensionados para os suportar. Este tipo de esforço pode provocar danos no isolamento que reveste os condutores, contudo o número de falhas devido a estes efeitos é reduzido.

Por outro lado, os enrolamentos internos são afectados por tensões de compressão, que se manifestam de duas formas, já mencionadas em 2.3.3.2. Uma que ocorre quando a bobina interna é suportada por espaçadores posicionados axialmente, chamado “*forced buckling*”, e outra que ocorre na ausência destes suportes, chamado “*free buckling*”. Na primeira, podem verificar-se deformações entre os suportes, como mostra a Figura 2.26, com a curvatura orientada para o interior da circunferência do enrolamento. A segunda, pode ter como efeito a projecção do enrolamento para dentro ou para fora em um ou mais pontos da circunferência, como ilustra a Figura 2.27. Isto significa que a resistência mecânica dos condutores é superior à que fornece a estrutura de suporte.

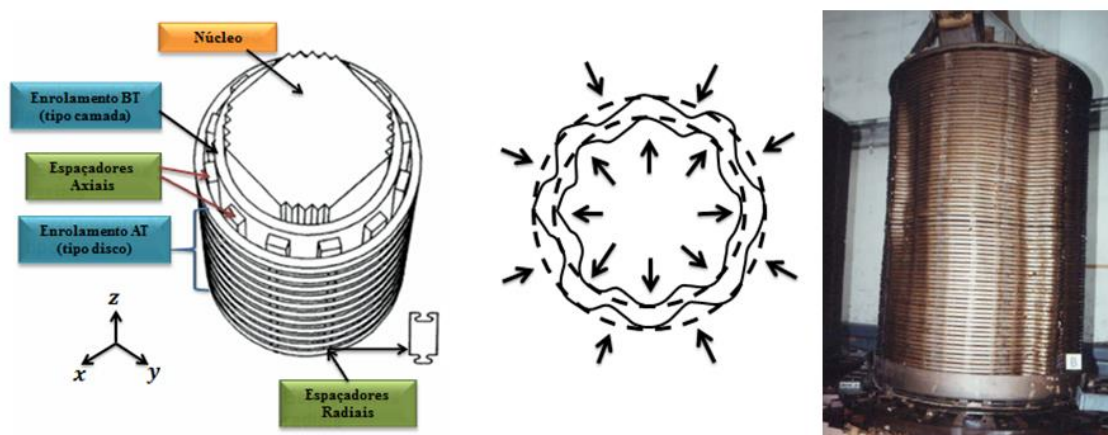


Figura 2.26: Transformador, respectivos componentes e deformação “*Forced Buckling*”. Exemplo de transformador danificado devido ao “*Forced Buckling*”. Adaptado de (Azevedo, 2007) (Junior, 2010).

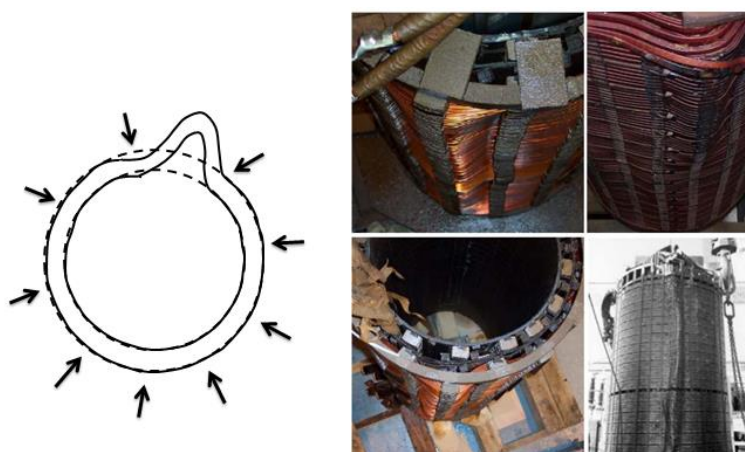


Figura 2.27: Deformação “*Free Buckling*”. Exemplos de transformadores danificados por esta deformação. Adaptado de (Junior, 2010).

Enrolamentos folgados ou frouxos, baixa resistência mecânica das estruturas de suporte em relação ao condutor e utilização de materiais inadequados ao seu propósito, são alguns dos factores identificados como auxiliares no acontecimento de deformações.

2.3.4.2 Efeitos das forças axiais

As forças axiais compressivas são as mais comuns e as que provocam piores danos nos enrolamentos dos transformadores. Vibrações devido a este tipo de força, ou falta de firmeza ao enrolar e atar a bobina, encontram-se entre as principais causas de defeitos. As falhas mais conhecidas e estudadas são a deformação das estruturas de fixação das extremidades dos enrolamentos ou “clamping”, a inclinação entre os espaçadores radiais ou “bending”, e a inclinação dos próprios condutores ou “tilting”.

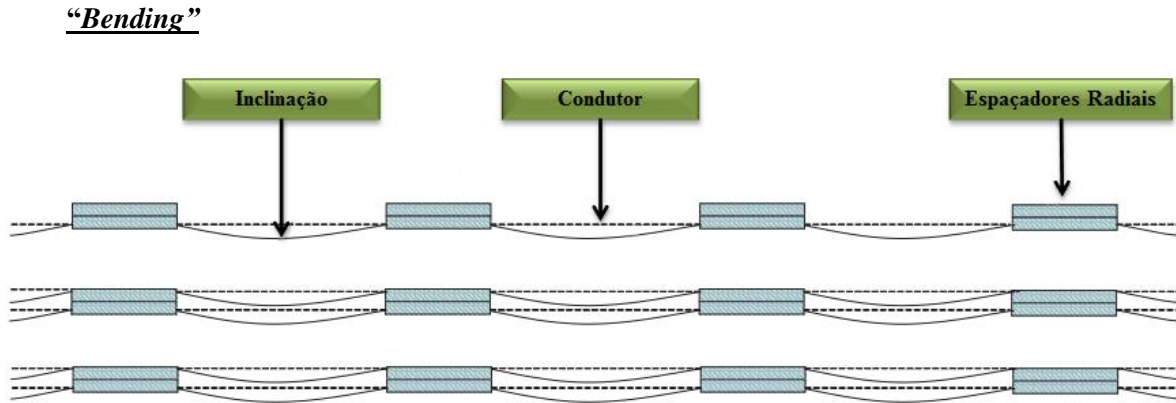


Figura 2.28: Vista lateral de condutores com inclinação entre os espaçadores radiais. Adaptado de (Azevedo, 2007).

Este tipo de falha acontece quando sob acção das forças axiais, os condutores dos enrolamentos sofrem inclinações entre os espaçadores isolantes colocados radialmente (Figura 2.28), sendo estas curvaturas num plano vertical. Os esforços deste tipo podem ser estimados a partir de (2.16), onde (F_a) é a força axial em [N/m], (L) é a distância existente entre os espaçadores axiais, (e) é espessura do condutor e (h_a) é a dimensão axial do condutor.

$$\sigma_b = \frac{F_a L^2}{2e h_a^2} \text{ [N/m}^2\text{]} \quad (2.16)$$

A experiência mostra que os maiores efeitos ocorrem nos cantos dos espaçadores radiais (Figura 2.29), pelo que para evitar grandes danos, o valor do esforço nessas zonas deve ser inferior ao suportável pelo condutor.

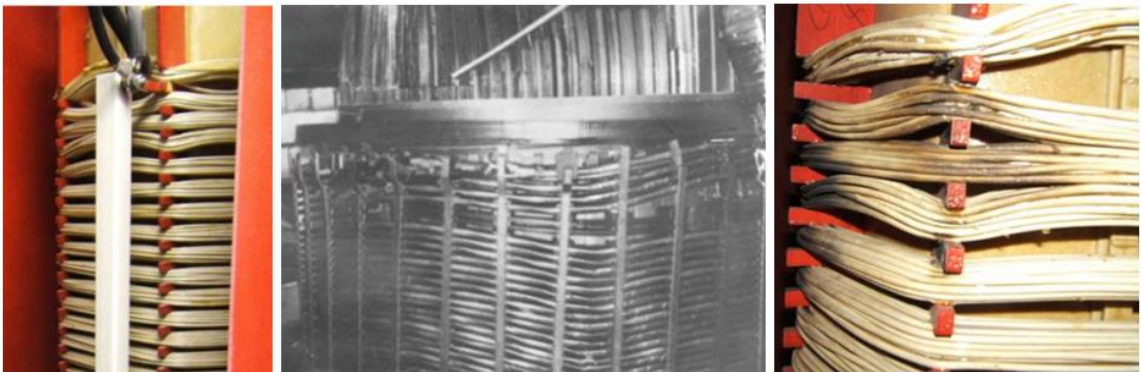


Figura 2.29: Exemplos de inclinações entre os espaçadores, “Bending”. Adaptado de (Junior, 2010).

“Tilting”

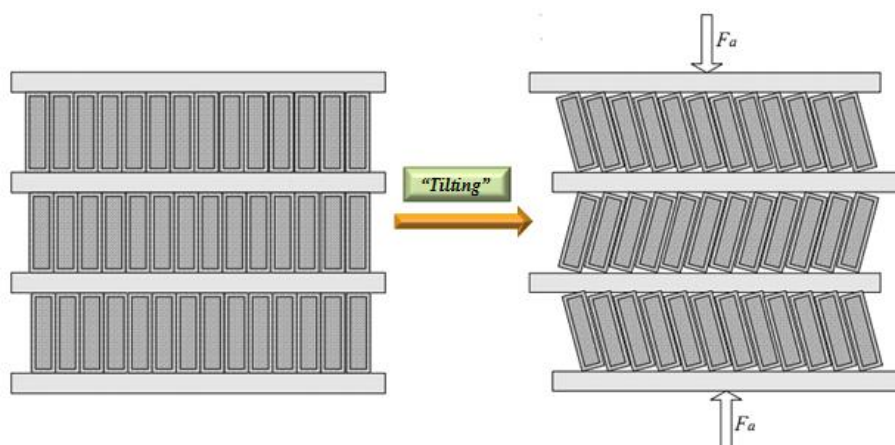


Figura 2.30: Inclinação dos condutores devido a forças axiais. Adaptado de (Azevedo, 2007) (Junior, 2010).



Figura 2.31: Exemplo de “Tilting”. Adaptado de (Junior, 2010).

O “*tilting*” é um defeito encontrado principalmente em grandes transformadores, e caracteriza-se pela inclinação dos condutores em forma de zig-zag perante valores carga superiores ao limite que os enrolamentos suportam (Figura 2.30 e Figura 2.31).

A principal causa deste defeito é a compressão axial aplicada nos enrolamentos, a qual é transmitida por meio dos espaçadores e estruturas de suporte do transformador, pelo que se verifica que estes esforços são dependentes das características construtivas dos enrolamentos. A expressão (2.17) oferece uma alternativa para o cálculo de tais tensões, onde (E) representa o módulo da elasticidade, (h) a dimensão axial do condutor, (r) o raio do enrolamento, (m) o número de cunhas, (s) o comprimento dos espaçadores, (c) o módulo equivalente da elasticidade do papel isolante e (e) a dimensão radial do condutor.

$$\sigma_{crit} = \frac{E \cdot h^2}{14 \cdot R^2} + \frac{m \cdot s \cdot c \cdot e^2}{12 \cdot \pi \cdot r \cdot h^2} \text{ [N/m}^2\text{]} \quad (2.17)$$

2.3.5 Estudos e investigações sobre esforços

Algumas equipas de investigação sobre esforços electromecânicos concordam em que os esforços nos enrolamentos dos transformadores e limitadores supercondutores podem ser obtidos por meio dos métodos já existentes para transformadores convencionais. Isto, devido à semelhança existente no fabrico dos mesmos, embora nas últimas décadas tenha existido um auge nas tecnologias que permitem um estudo mais detalhado e sensível dos efeitos dos esforços nos enrolamentos supercondutores.

Um estudo sobre as forças electromagnéticas existentes nos enrolamentos de um transformador trifásico de 15 kVA, foi realizado por (Azevedo, et al.), utilizando o método de elementos finitos, onde se comparam as situações de funcionamento normal e sob curto-circuito para o transformador com e sem derivações (Figura 2.32). Nesta experiência, concluiu-se que o dispositivo sente uma força radial quase 3000 vezes maior na situação b) em relação a a), e que o aumento nas forças axiais não apresenta grande relevância em relação aos radiais. Além do anterior, nos caso c) e d) observa-se um pequeno aumento nas forças radiais e um aumento elevado nas forças axiais, de aproximadamente 280 vezes. Finalmente, verifica-se que nas situações de curto-circuito, b) e d), existe um factor de aumento das forças radiais de 1.5 e das forças axiais de 2500.

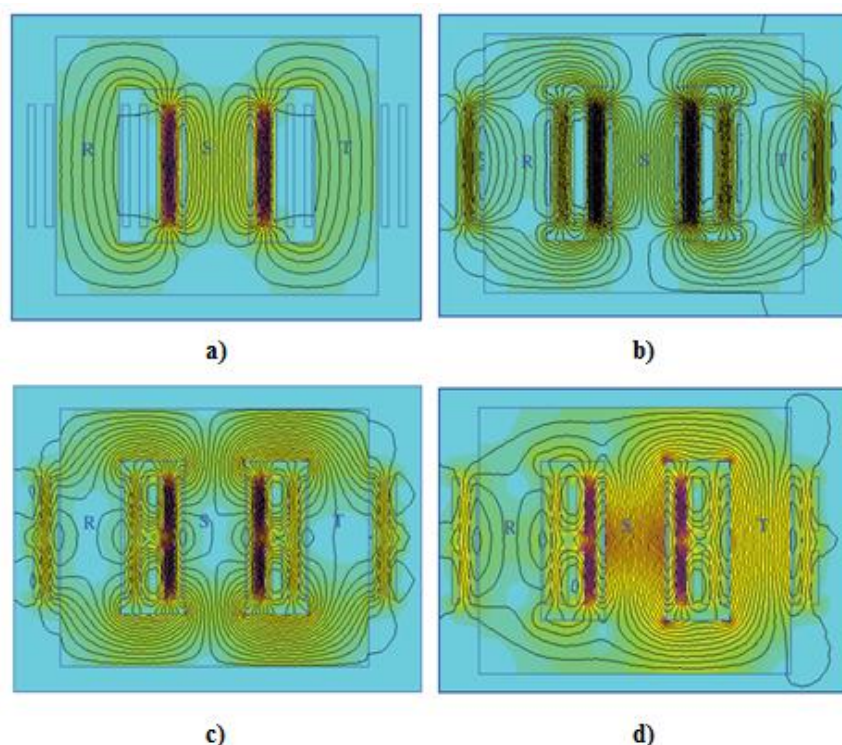


Figura 2.32: Ensaio do transformador trifásico de 15kVA. a) Funcionamento normal. b) Sob Curto-Circuito. c) Com derivação em funcionamento normal. d) Com derivação sob Curto-Circuito. Adaptado de (Azevedo, et al.).

Uma outra abordagem é adoptada por um grupo de investigadores, que analisaram no domínio do tempo os efeitos das forças radiais em um transformador trifásico de 100 MVA. A Figura 2.33 mostra as formas de onda das correntes e densidades de fluxos do transformador em funcionamento normal, a) e b), e sob correntes CC, c) e d), sendo possível observar o aumento dos valores pico de ambos os parâmetros.

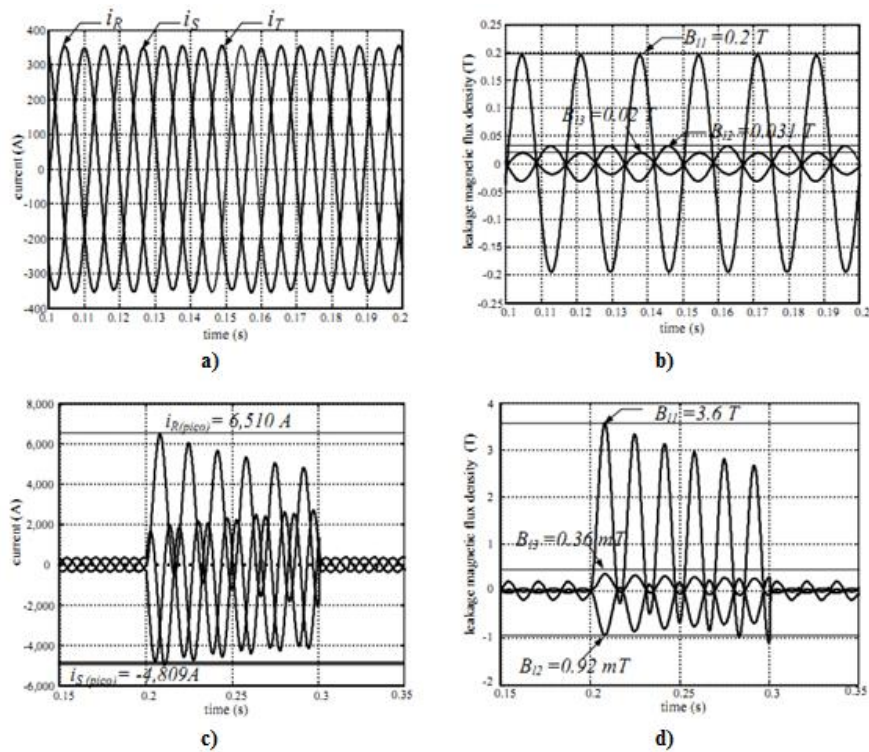


Figura 2.33: Funcionamento normal: a) Corrente, b) Densidade de fluxo. Curto-Circuito: c) Corrente, d) Densidade de fluxo. Adaptado de (Azevedo, Delaiba, Oliveira, Carvalho, & Bronzeado, 2007).

Com base na corrente e na densidade de fluxo referidas anteriormente, são representadas na Figura 2.34, as forças radiais resultantes nos enrolamentos interno e externo para as situações de curto-circuito e funcionamento normal.

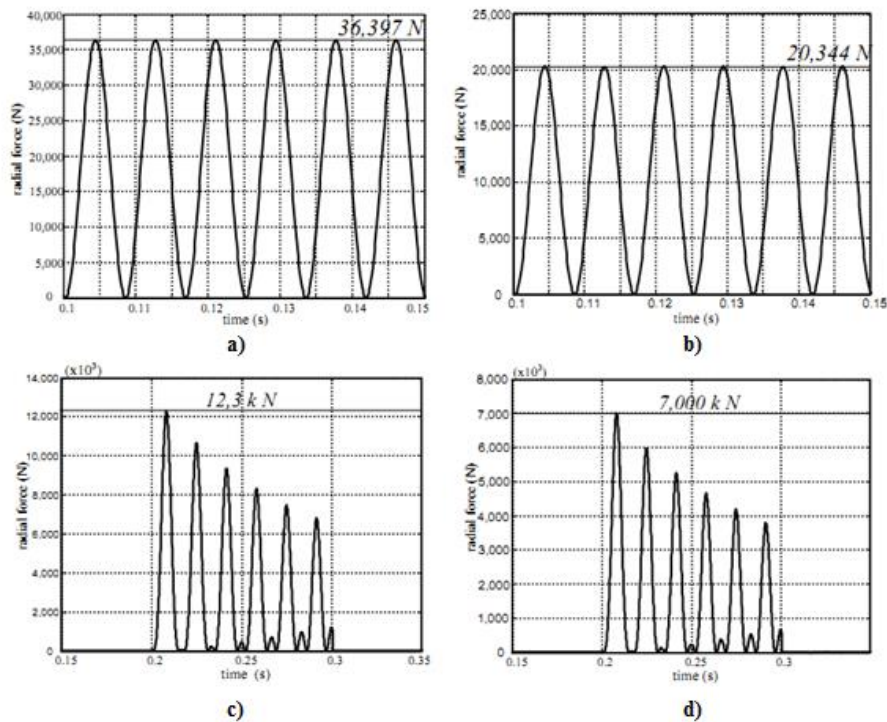
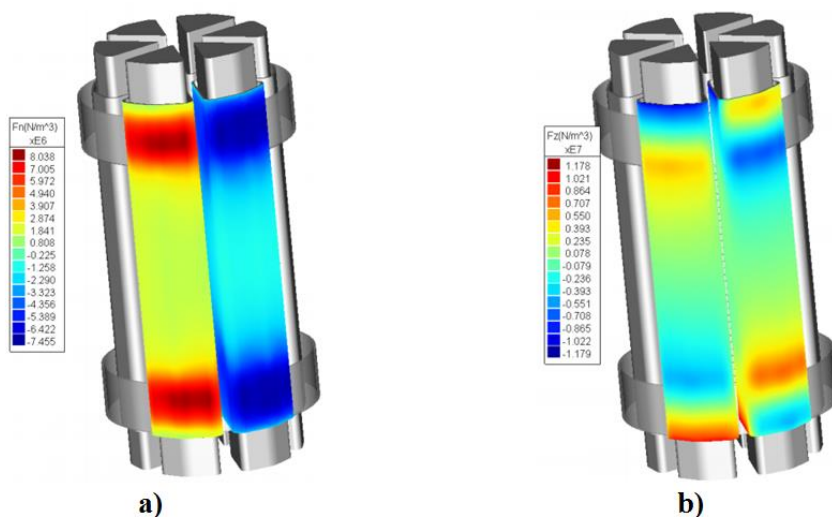


Figura 2.34: Forças radiais. Funcionamento normal: a) Enrolamento externo, b) Enrolamento interno. Curto-Circuito: c) Enrolamento externo, d) Enrolamento interno. Adaptado de (Azevedo, Delaiba, Oliveira, Carvalho, & Bronzeado, 2007).

Figure 1 consists of two parts. Part (a) is a 3D schematic of the central column of the ITER tokamak. It shows a central core (Núcleo) composed of segments A, A', B, B', C, and C'. Surrounding the core are two sets of coils: AC coils (Bobinas AC) and DC coils (Bobinas DC). Part (b) is a 3D simulation of the magnetic field distribution. It shows the central column with magnetic field lines and a color-coded scale for the magnetic field magnitude (Bm in Tesla) ranging from 0.000 to 9.000. The scale is provided in a table:

| Bm(Tesla) |
|-----------|
| 9.000 |
| 8.710 |
| 8.419 |
| 8.129 |
| 7.839 |
| 7.548 |
| 7.258 |
| 6.968 |
| 6.678 |
| 6.387 |
| 6.097 |
| 5.807 |
| 5.516 |
| 5.226 |
| 4.936 |
| 4.645 |
| 4.355 |
| 4.065 |
| 3.774 |
| 3.484 |
| 3.194 |
| 2.904 |
| 2.613 |
| 2.323 |
| 2.033 |
| 1.742 |
| 1.452 |
| 1.162 |
| 0.871 |
| 0.581 |
| 0.291 |
| 0.000 |

Observa-se na Figura 2.35 b), o aumento da densidade de fluxo magnético nos enrolamentos AC devido ao fluxo gerado pelos DC, a partir dos quais são obtidos os resultados mostrados na Figura 2.36 e Figura 2.37, com os valores de forças radiais e axiais a longo das bobinas, respectivamente. Nas condições em que foi simulado este LCS, observa-se que os efeitos das forças radiais são maiores nas zonas dos enrolamentos AC cobertas pelos enrolamentos DC. Também se observa que existem efeitos diferentes aquando seja analisado o interior ou exterior da bobina AC, mas de uma forma geral os valores de força negativos representam compressão e os positivos tracção.



36

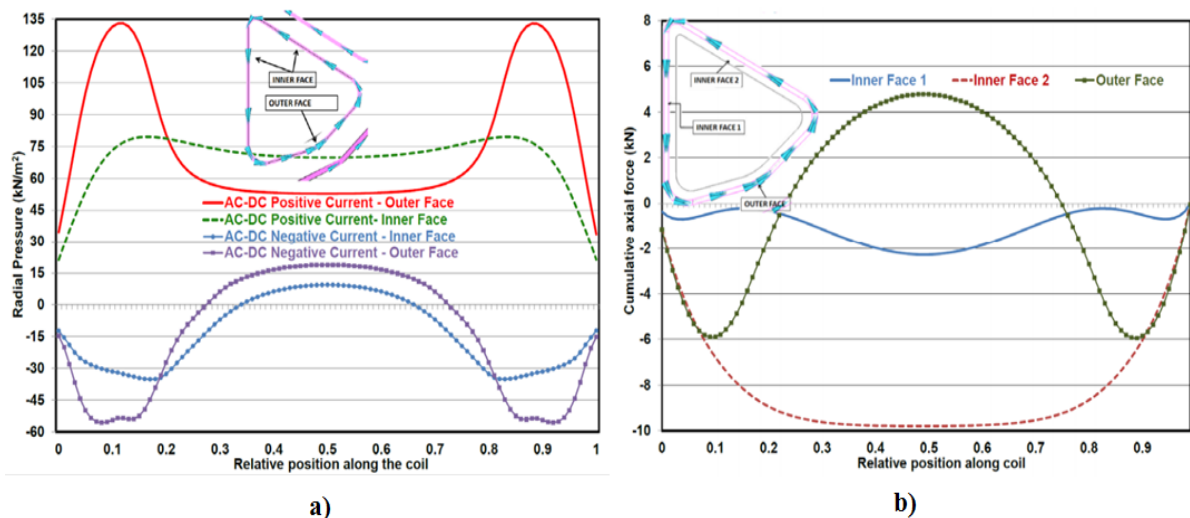


Figura 2.37: a) Distribuição de força radial ao longo das bobinas AC. b) Força axial cumulativa ao longo das bobinas AC. Adaptado de (Cabanés Aracil, Lopez-Roldan, Coetzee, Darmann, & Tang, 2012).

2.4 Conclusão

Neste capítulo foram abordados brevemente os temas relativos aos materiais supercondutores de alta temperatura (SAT), as principais características e formatos comerciais relevantes para este trabalho. Os limitadores de corrente supercondutores constituíram outro tema de interesse, principalmente o funcionamento dos modelos expostos.

Foi ainda realizado um levantamento bibliográfico sobre os esforços electrodinâmicos e respectivos métodos de cálculo, tendo-se também representado as suas causas e consequências em enrolamentos convencionais ou supercondutores.

Centros de atenção constituíram as diferentes metodologias existentes no cálculo das forças envolvidas, desde as mais simples e grosserias até as mais sofisticadas. Finalmente, expuseram-se alguns exemplos de trabalhos realizados sobre a matéria em questão, denotando-se a escassez de estudos sobre enrolamentos de material supercondutor.

3 Simulações e análise de resultados

3.1 Introdução

A necessidade de manter uma constante supervisão e avaliação das condições em que se encontram os elementos do sistema eléctrico, nomeadamente transformadores e limitadores, e o intuito de aumentar a poupança nos investimentos, têm impulsionado o desenvolvimento de ferramentas e técnicas de modelização. Estas viabilizam um apurado diagnóstico das condições do equipamento e sugerem acções que prolongam a vida útil dos mesmos.

Sabendo que algumas das possíveis configurações dos transformadores e limitadores são muito complexas, as técnicas mais utilizadas para modelizar estes dispositivos são: a modelagem a partir de equações de natureza eléctrica e magnética, a modelagem aplicando técnicas no domínio do tempo e a modelagem empregando MEF.

São vários os *softwares* que baseiam-se no MEF, mas é do interesse deste trabalho o FLUX2D, que permite a simulação de fenómenos electrodinâmicos, electroestáticos, magnéticos e térmicos. Atendendo a que este programa é constituído pelo conjunto de serviços típicos de elementos finitos, pré-processamento, processamento e pós-processamento, verifica-se que é apropriado para a análise, optimização e concepção dos dispositivos electromagnéticos em estudo. Na primeira etapa referida, é realizada a modelização do problema, são definidas as propriedades físicas do dispositivo e gera-se a malha de elementos finitos. A segunda fase consiste na resolução do problema em análise por meio de ferramentas de cálculo. Finalmente, os resultados obtidos no processamento são interpretados através do programa gráfico, o qual permite a inspecção pontual da solução.

3.2 Análise dos esforços em transformadores

Nesta secção serão abordadas as principais características dos transformadores escolhidos neste estudo, e a partir das quais são obtidos e comparados os valores dos esforços em enrolamentos convencionais e supercondutores.

3.2.1 Transformador monofásico de enrolamentos paralelos

3.2.1.1 Aspectos físicos e modelo de simulação

O modelo de transformador monofásico desenvolvido por (Figueira, 2013), representado na Figura 3.1, tem como base um conjunto de expressões de dimensionamento associadas ao núcleo e/ou aos enrolamentos.

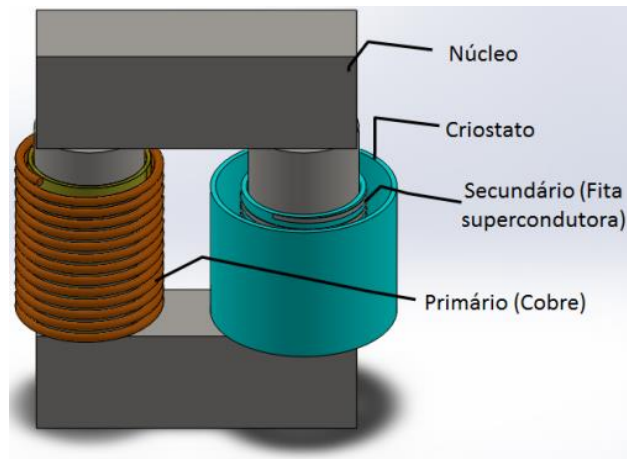


Figura 3.1: Transformador monofásico de enrolamentos paralelos. Retirado de (Figueira, 2013).

Este núcleo (Figura 3.2), é constituído por 106 chapas metálicas de FeSi de espessura 0,50 mm montadas em paralelo e isoladas entre si. Apresenta colunas formadas por quatro degraus e uma secção circular de 31 cm², o que resulta numa secção útil de 25,5 cm². Verifica-se esta secção quando considerado o coeficiente de empilhamento $k_l = 0,95$, valor típico para ligas cristalinas, e o coeficiente de preenchimento $k_f = 0,866$, fracção do círculo ocupada usualmente por um núcleo de quatro degraus.

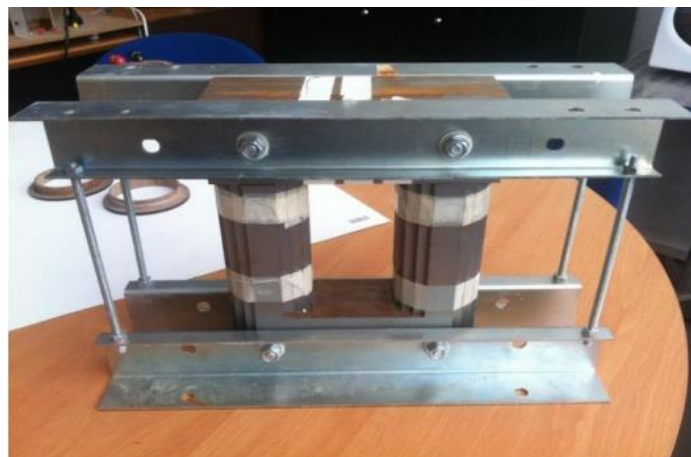


Figura 3.2: Modelo laboratorial de núcleo do transformador.

Na construção do enrolamento primário deste transformador utilizou-se fio de cobre esmaltado de 1,5 mm² e foram enroladas 347 espiras em torno de um suporte de acrílico (Figura 3.3 a)). Já para o secundário foram consideradas duas bobinas, uma convencional e uma supercondutora (Figura 3.3 b) e c)), com 30 espiras cada, sendo a fita SC de material Bi-2223 com as características representadas na Tabela 3.1. Foi construído para este protótipo, um criostato que se utiliza para submergir o SAT no azoto líquido.

Tabela 3.1: Características técnicas da fita Innost Bi-2223

| Grandeza | Valor |
|---|------------------------------------|
| Corrente crítica | 90 A |
| Densidade crítica de corrente de engenharia | 93 A/mm ² |
| Largura | 4,2(±0,2)mm |
| Espessura | 0,23(±0,02)mm |
| Raio mínimo de curvatura | 30 mm (5% de degradação em I_C) |

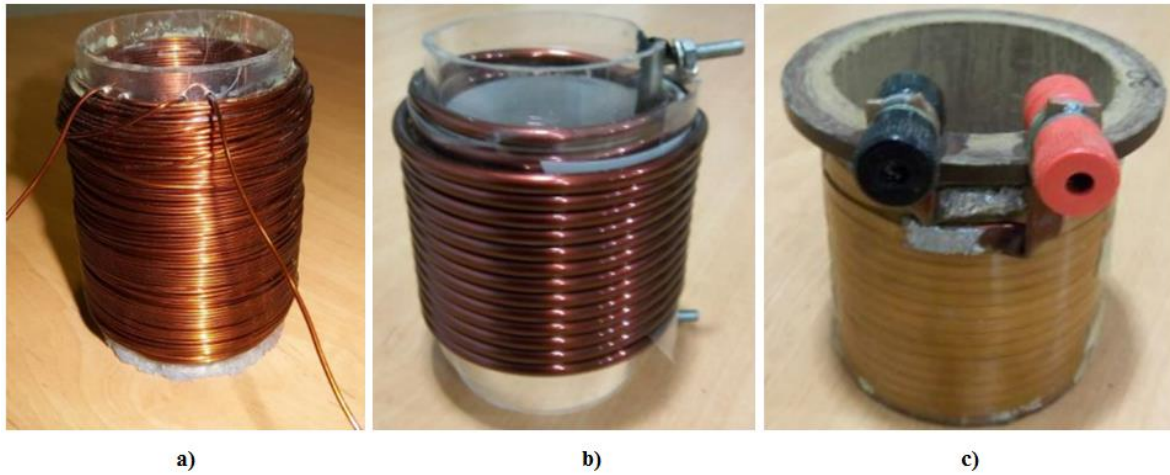


Figura 3.3: Enrolamentos do transformador. a) Primário, b) Secundário de cobre, c) Secundário de Bi-2223. Adaptado de (Figueira, 2013).

Foi considerado no cálculo da potência do transformador a expressão (3.1), em que o coeficiente de utilização é $K_u = 0,4$ e o coeficiente que relaciona a secção do núcleo com a área disponível na janela é $K_j = 2,84$. A frequência de trabalho é $f = 50$ Hz, a densidade de corrente é $J = 2 \text{ A} \cdot \text{mm}^2$ idealizando como sendo ambos enrolamentos como convencionais, e B_m é 1,2 T para evitar a saturação do ferro, e consequentes distorções na corrente e atrasos do fluxo em relação à corrente.

$$S = 2,22 \cdot S_{fe}^2 \cdot f \cdot B_m \cdot J \cdot K_u \cdot K_j \text{ [VA]} \quad (3.1)$$

O cálculo da relação tensão-espira $\left(\frac{U_{ef}}{n}\right)$, foi realizada a partir da equação (3.2), obtendo-se o valor 0,6 V/espira, dando lugar aos valores de tensões e correntes nominais que caracterizam o transformador, representados na Tabela 3.2, assim como uma impedância nominal igual a $0,5 \Omega$.

$$\frac{U_{ef}}{n} = \frac{2 \cdot \pi}{\sqrt{2}} \cdot S_{fe} \cdot f \cdot B_m \text{ [V/espira]} \quad (3.2)$$

Tabela 2.2: Valores nominais das relações de tensão/corrente. Adaptado de (Figueira, 2013).

| | Primário | Secundário |
|-----------------------------|-----------------|-------------------|
| Tensão Nominal (V) | 208,2 | 18,0 |
| Corrente Nominal (A) | 3,1 | 36,0 |

Verificou-se que o protótipo ficou subaproveitado, visto que da potência aparente que idealmente devia ter o transformador, isto é 1,64 kVA, só foi possível a utilização de 648 VA. As dimensões e características físicas pormenorizadas encontram-se em (Figueira, 2013).

A obtenção de um modelo de simulação acertado para o transformador monofásico constitui o primeiro passo na geração de resultados de elevada precisão. Encontram-se na Figura 3.4 o modelo criado, o qual apresenta as dimensões do núcleo, em 2D e em [mm], equivalentes às que tem o protótipo real, assim como é mostrada a respectiva malha de elementos finitos. O núcleo é composto pelas duas zonas azuis, a vermelho observam-se os enrolamentos que são modelizados como sendo cada um composto por duas placas, uma à esquerda e outra à direita. Desta última característica do modelo dos enrolamentos podem advir algumas imprecisões nos resultados, pois os enrolamentos deviam ser cilíndricos e não rectangulares. Para efeitos da simulação em 3D, é definida uma

profundidade de 60 mm. A malha de elementos finitos utilizada verifica maior afinidade em zonas onde as variações dos valores de densidade de fluxo magnético são mais elevadas.

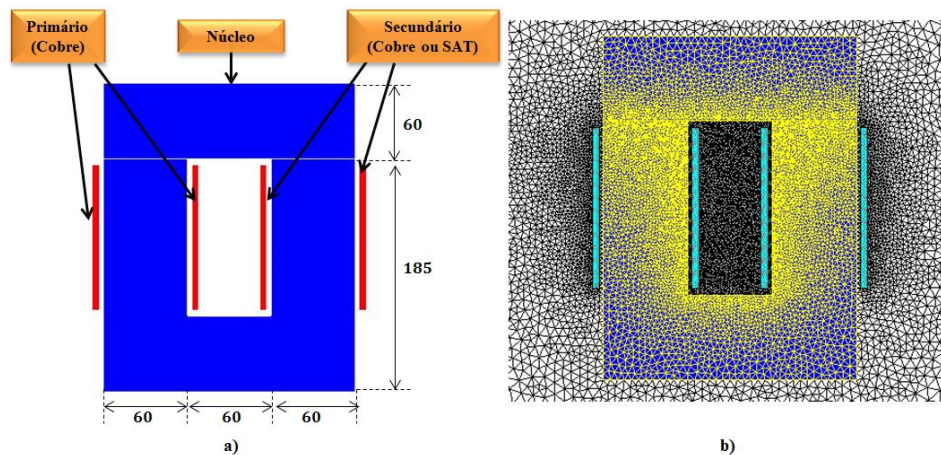


Figura 3.4: a) Modelo de simulação do transformador monofásico. b) Modelo com malha de elementos finitos.

As simulações no *software* utilizado só são possíveis após a definição de um conjunto de características, para além das já mencionadas, tais como os materiais associados a cada região e o circuito que representa o dispositivo.

O núcleo utilizado é definido como sendo composto por regiões magnéticas não condutoras de material caracterizado pelo gráfico representado em Figura 3.5.

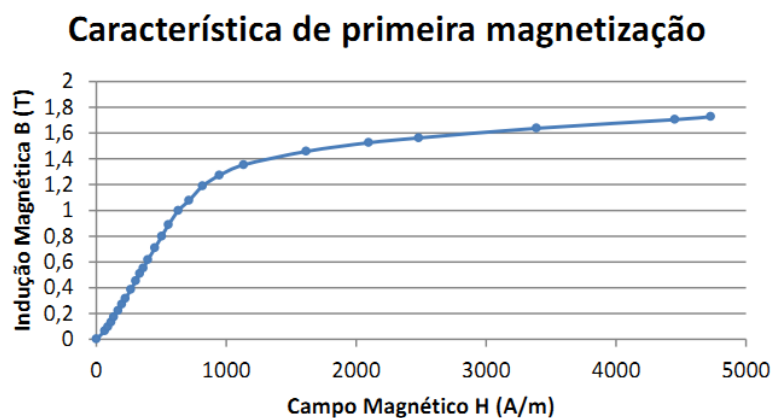


Figura 3.5: Característica de primeira magnetização do núcleo utilizado. Adaptado de (Vilhena, 2012).

As zonas geométricas que representam os enrolamentos do primário foram definidas como regiões condutoras de cobre. Já para o secundário foram definidas como regiões condutoras de cobre ou material supercondutor, aquando o tipo de simulação fosse no transformador convencional (TC) ou no supercondutor (TSC). Nas geometrias que representam as partes à esquerda e à direita de cada bobina, foram impostos os sentidos das correntes, sendo orientados positivamente e negativamente, respectivamente.

O modelo de transformador é ainda representado por um circuito eléctrico que faz a ligação à geometria, indicado na Figura 3.6, onde podem ser observadas duas bobinas fictícias associadas ao primário ou o secundário, equivalentes a cada placa do desenho 2D ($L1_{Esquerda}$, $L1_{Direita}$, $L2_{Esquerda}$, $L2_{Direita}$), devido a que o programa exige uma definição

independente das correntes em cada uma destas zonas geométricas. Existem três resistências, uma associada à impedância da linha (R_{Linha}), uma auxiliar que permite evitar erro no *software* e que apresenta um valor muito elevado (R_1) e finalmente a impedância da carga a qual se encontra ligado o transformador (R_{Carga}). Foram representados também interruptores (S, S_1) que permitem simular o circuito em geral e a situação de CC. Pode-se observar também uma fonte de alimentação AC, (V_1).

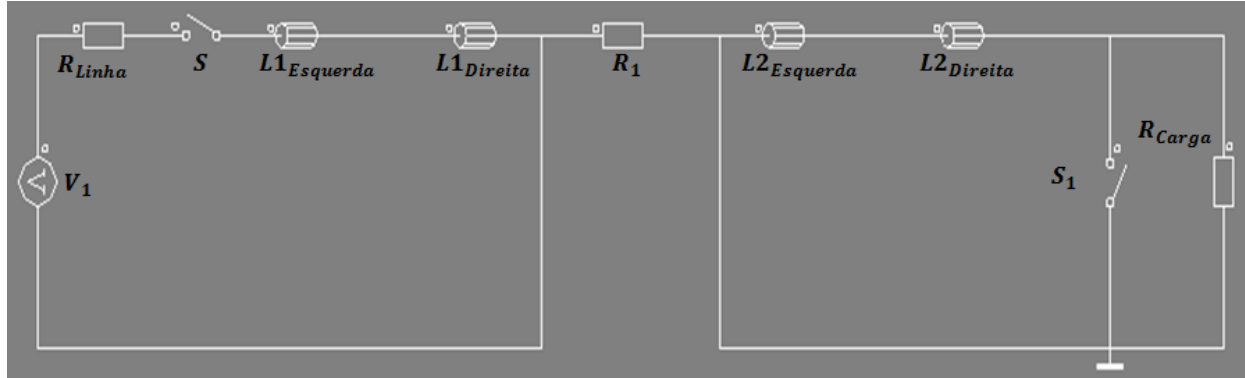


Figura 3.6: Esquema eléctrico do transformador utilizado na simulação.

Expostos os aspectos físicos, estão criadas as condições para a realização de avaliações e análises de esforços nas situações em que o transformador se encontra em curto-circuito, plena carga e folgado, realizando distinção entre os efeitos nos enrolamentos de cobre e nos supercondutores.

3.2.1.2 Resultados obtidos por simulação

No contexto de estudo do comportamento das magnitudes das forças em diferentes estados de funcionamento do transformador foram realizadas simulações com as especificações representadas na Tabela 3.3. Todas as simulações foram efectuadas com passo de 1 ms em um intervalo de 0,5 s, gerando 501 passos. A tensão de entrada aplicada é sinusoidal de forma $u(t) = U_{ef} \cdot \text{sen}(2\pi \cdot f \cdot t)$. O curto-circuito simulado neste dispositivo é gerado pelo fecho do interruptor (S_1) em $t = 5$ ms. A análise de resultados deste protótipo, é realizada considerando um valor fixo da tensão na carga $U_C \cong 6$ V, o qual é escolhido por forma a ser o maior valor de tensão que em todas as simulações é aproximadamente o mesmo.

Tabela 3.3: Especificações utilizadas nas simulações do transformador.

| Parâmetro | Valor |
|--|--|
| Fonte de Alimentação [V _{ef}] | 200 |
| Frequência [Hz] | 50 |
| Resistência da Linha [Ω] | 50 |
| Resistência da Carga [Ω] | $R_{c1} = 0,46; R_{c2} = 0,55; R_{c3} = 1,1; R_{c4} = 2,2$ |
| Resistência Infinita [Ω] | $10^{(12)}$ |
| Resistência do Primário [Ω] | 1,0171 |
| Resistência do Secundário Cobre [Ω] | 0,0061 |
| Resistência do Secundário SC [Ω] | $10^{(-9)}$ |

Na Figura 3.7 (a, b, c, d), encontram-se representadas as distribuições de densidade de fluxo magnético no transformador convencional e no supercondutor, em funcionamento normal, isto é, para o valor de resistência de carga R_{c2} muito próximo da carga nominal, e para a situação de curto-circuito.

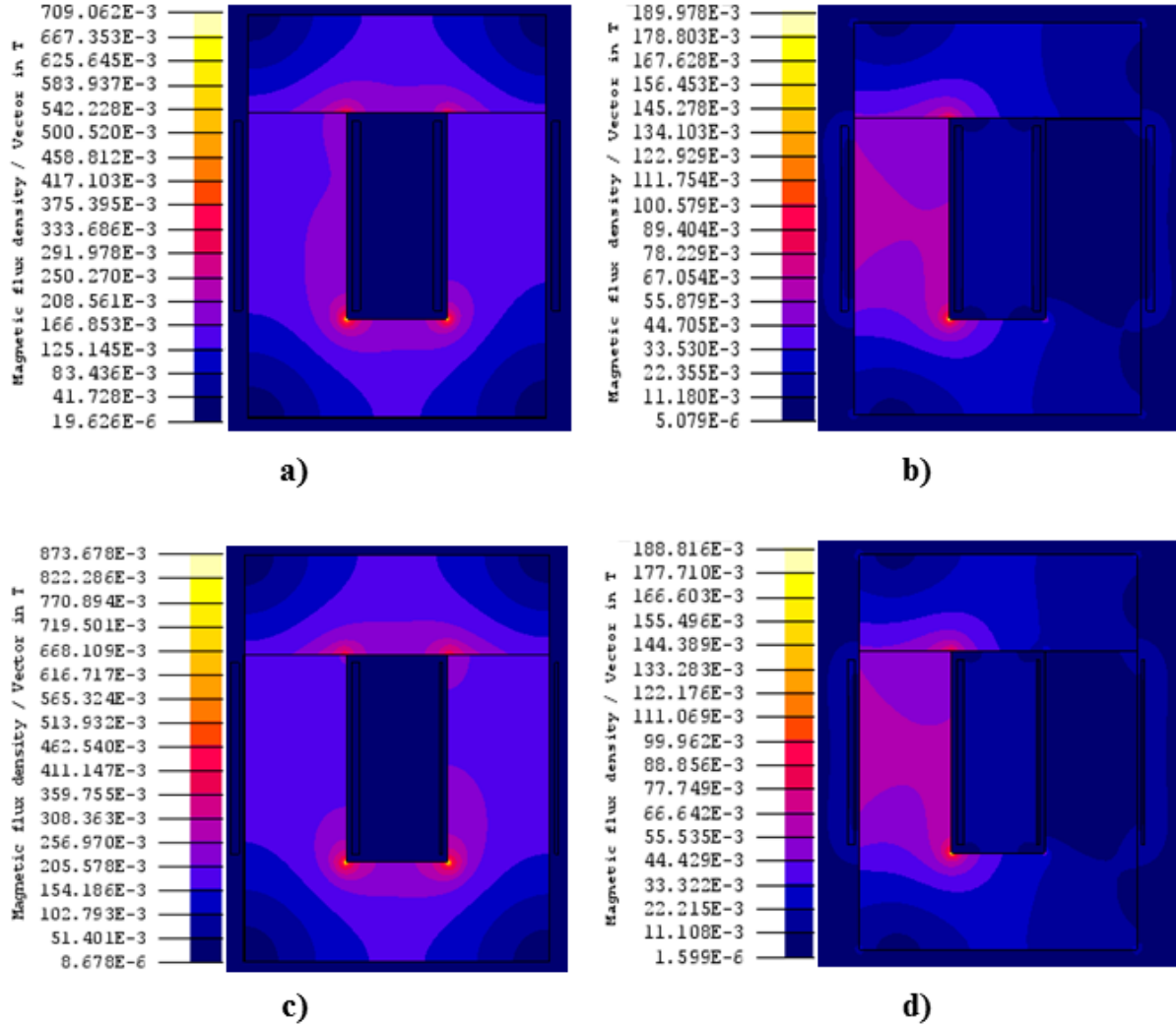


Figura 3.7: Distribuição da densidade de fluxo magnético em transformador monofásico. a) Convencional em funcionamento normal. b) Convencional em CC. c) Supercondutor em funcionamento normal. d) Supercondutor em CC.

Nas situações representadas anteriormente verifica-se que não existe grande diferença nas distribuições da densidade de fluxo magnético, entre o transformador convencional e o supercondutor. Mas comparando a plena carga com o curto-circuito, existe uma queda nos valores de densidade de fluxo magnético bastante significativa, assim como uma distribuição menos equilibrada. Conclui-se também que em curto-circuito a densidade de fluxo magnético de dispersão encontra-se mais concentrado na coluna do enrolamento primário.

Para a representação dos vectores de densidade de fluxo magnético de dispersão e os vectores de força electromagnética ao longo da altura dos enrolamentos, foram definidos caminhos no interior das regiões geométricas que representam os enrolamentos.

Da Figura 3.8 (a, b, c, d), na qual encontram-se vectores que representam a densidade de fluxo de dispersão existente nos enrolamentos, pode-se concluir que os valores de dispersão mais elevados são nos extremos das bobinas, regiões nas quais as linhas de fluxo se fecham. É perceptível que a densidade de fluxo de dispersão magnético no interior das bobinas aumenta nas situações de falha.

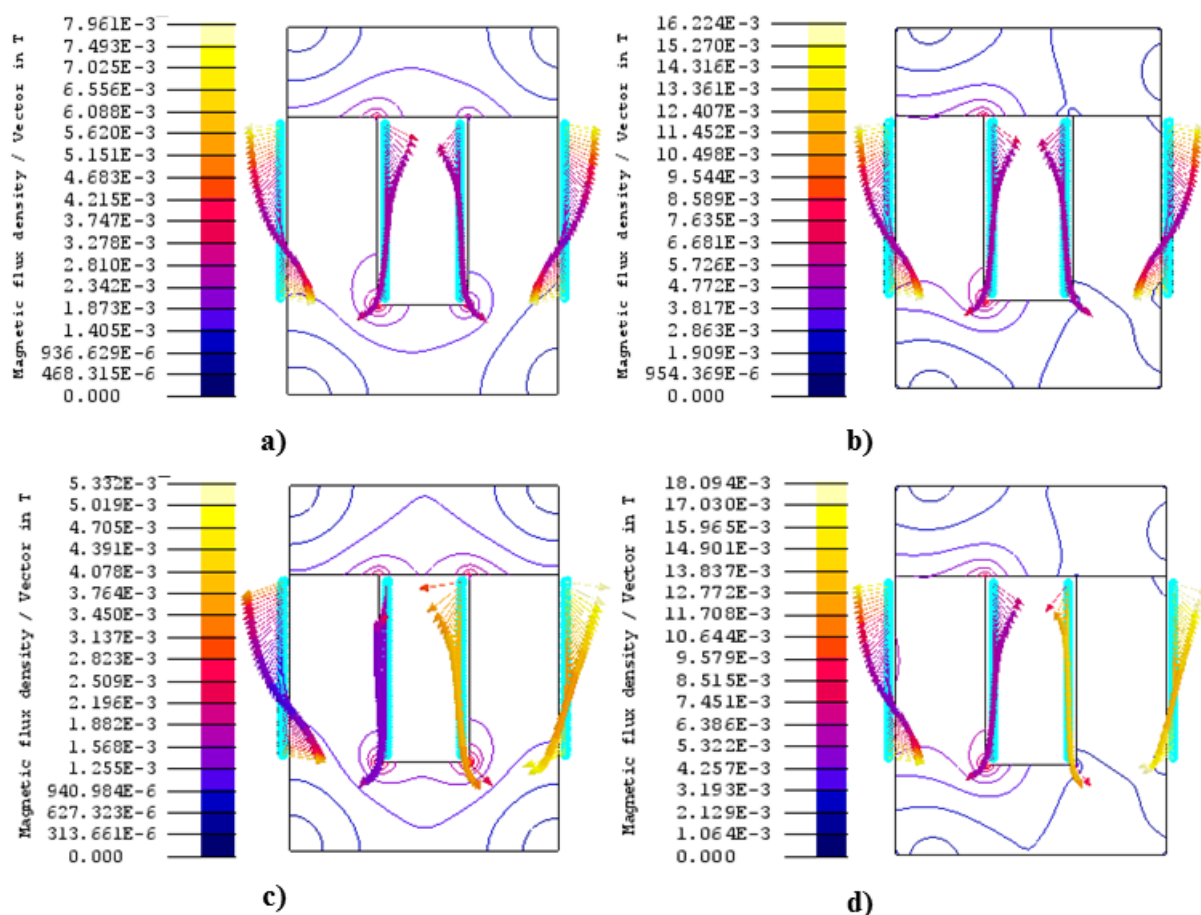


Figura 3.8: Vectores densidade de fluxo magnético dispersão presentes nos enrolamentos do transformador monofásico. a) Convencional em funcionamento normal. b) Convencional em CC. c) Supercondutor em funcionamento normal. d) Supercondutor em CC.

Para as mesmas situações apresentadas na Figura 3.7, representam-se na Figura 3.9 (a, b, c, d), o comportamento dos vectores de força presentes nos enrolamentos. É possível observar que o comportamento dos vectores de força, na situação de curto-circuito, é semelhante ao dos vectores na situação de normal funcionamento. Mas os valores destas forças no transformador convencional em curto-circuito são aproximadamente 4 vezes mais elevados que em funcionamento normal, enquanto no transformador supercondutor são aproximadamente 12 vezes maiores. Verifica-se ainda que as forças tomam valores máximos nos extremos dos enrolamentos.

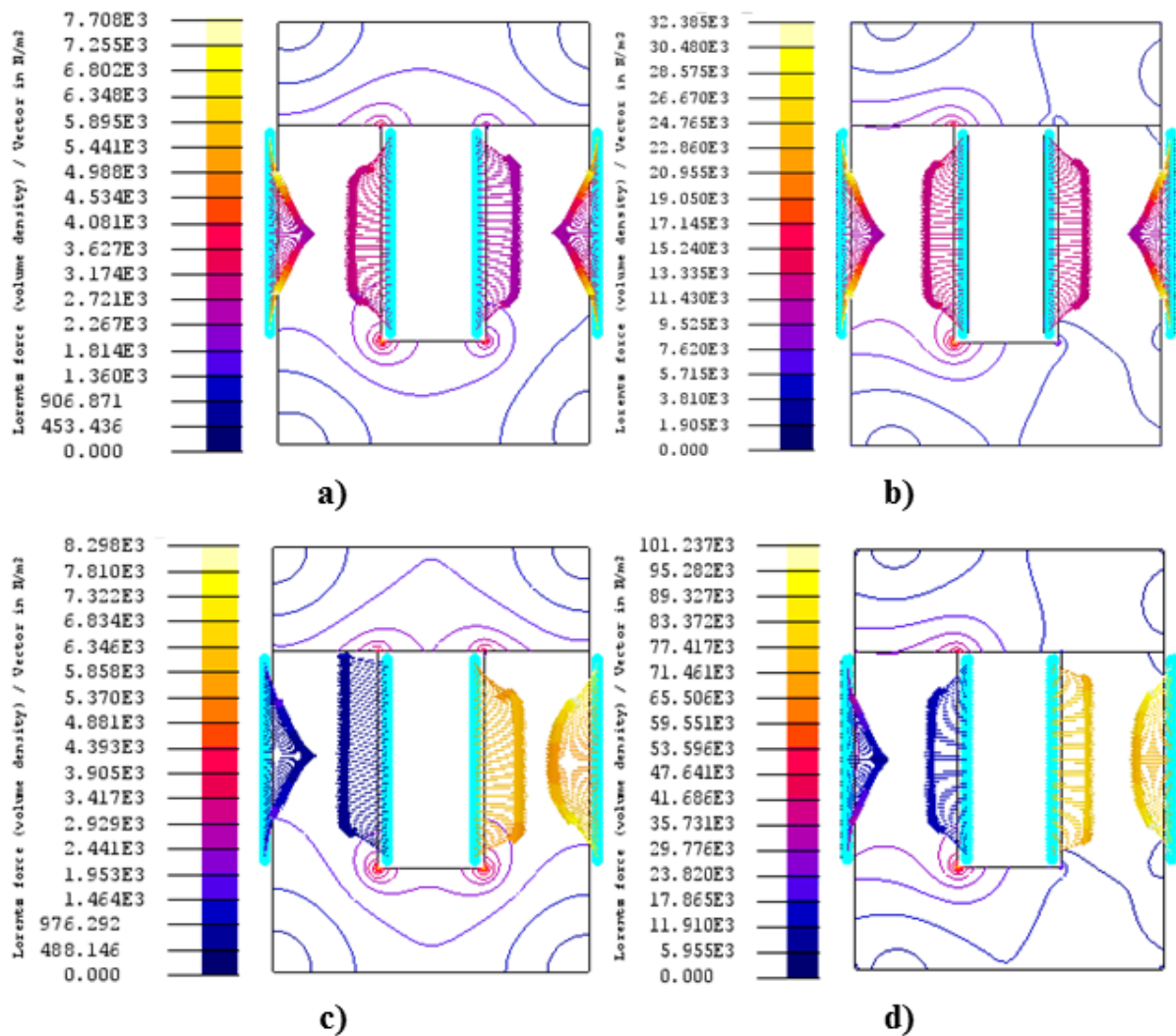


Figura 3.9: Vectors de força presentes nos enrolamentos do transformador monofásico. a) Convencional em funcionamento normal. b) Convencional em CC. c) Supercondutor em funcionamento normal. d) Supercondutor em CC.

A separação dos esforços, em forças radiais e axiais, é realizada a partir dos dados fornecidos pelo *software* FLUX2D, onde a componente normal é equivalente aos esforços radiais ao longo do enrolamento e a componente tangencial corresponde aos esforços axiais ao longo do enrolamento. Com o objectivo de realizar posteriores análises sobre estes esforços, e visto que o programa fornece os valores das forças em força por unidade de volume N/m^3 , decidiu-se apresentar os resultados em força por unidade de área N/m^2 , pelo que os resultados obtidos são multiplicado pelo comprimento médio de uma espira. O processo de obtenção dos gráficos de forças radiais e axiais segue os mesmos passos em todos os dispositivos estudados.

Ilustra-se em Figura 3.10, Figura 3.11, Figura 3.12 e Figura 3.13, os esforços radiais e axiais existentes em cada uma das regiões que representam os enrolamentos nos modelos de simulação, para os valores de carga da Tabela 3.3 e para o curto-circuito (CC). Nestes gráficos considera-se como origem de referência o extremo inferior de cada enrolamento.

Analisando os resultados separadamente para cada uma das zonas que definem os enrolamentos no modelo de simulação podem ser retiradas algumas conclusões. Em relação às forças radiais, representadas em Figura 3.10 e Figura 3.11, verificam-se algumas diferença entre os esforços

presentes nos enrolamentos primários do transformador convencional e do supercondutor. O enrolamento primário do transformador convencional apresenta esforços menos intensos nas simulações com cargas, quando comparado ao primário do transformador supercondutor. Mas na situação de curto-circuito verifica-se que ambos apresentam esforços de valores aproximados. Nos dois modelos de simulação a medida que se aumenta o valor da carga, pode-se observar que o intervalo de variação das forças e os máximos que elas tomam aumentam, sendo que perante curto-circuito estes máximos chegam a ser três ordens de grandeza maiores.

Nas curvas das forças radiais existentes nos enrolamentos secundários dos dois modelos de transformador, observa-se que nas simulações com cargas as intensidades das forças são muito baixas quando comparadas aos esforços que advêm da introdução de um curto-circuito. A diferença do que acontece no enrolamento primário, no secundário existe um aumento de aproximadamente uma ordem de grandeza nos esforços radiais quando comparadas as simulações no dispositivo convencional e no supercondutor.

De forma geral, as forças radiais exibidas nos enrolamentos dos dois protótipos de transformadores, são usualmente mais intensas ao longo da altura das bobinas.

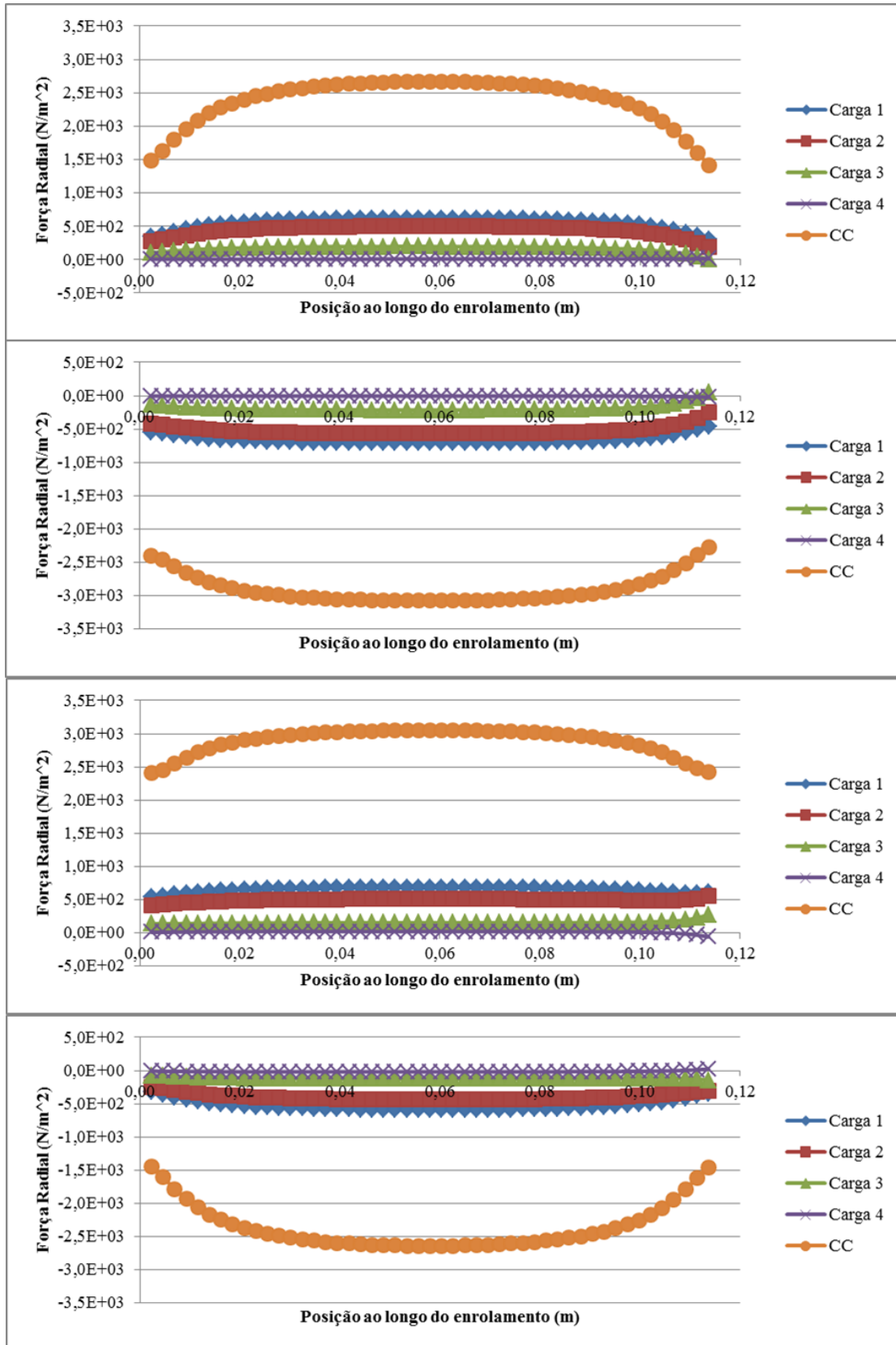


Figura 3.10: Forças Radiais nas regiões dos enrolamentos do transformador convencional. De cima para baixo, esquerda do primário, direita do primário, esquerda do secundário e direita do secundário.

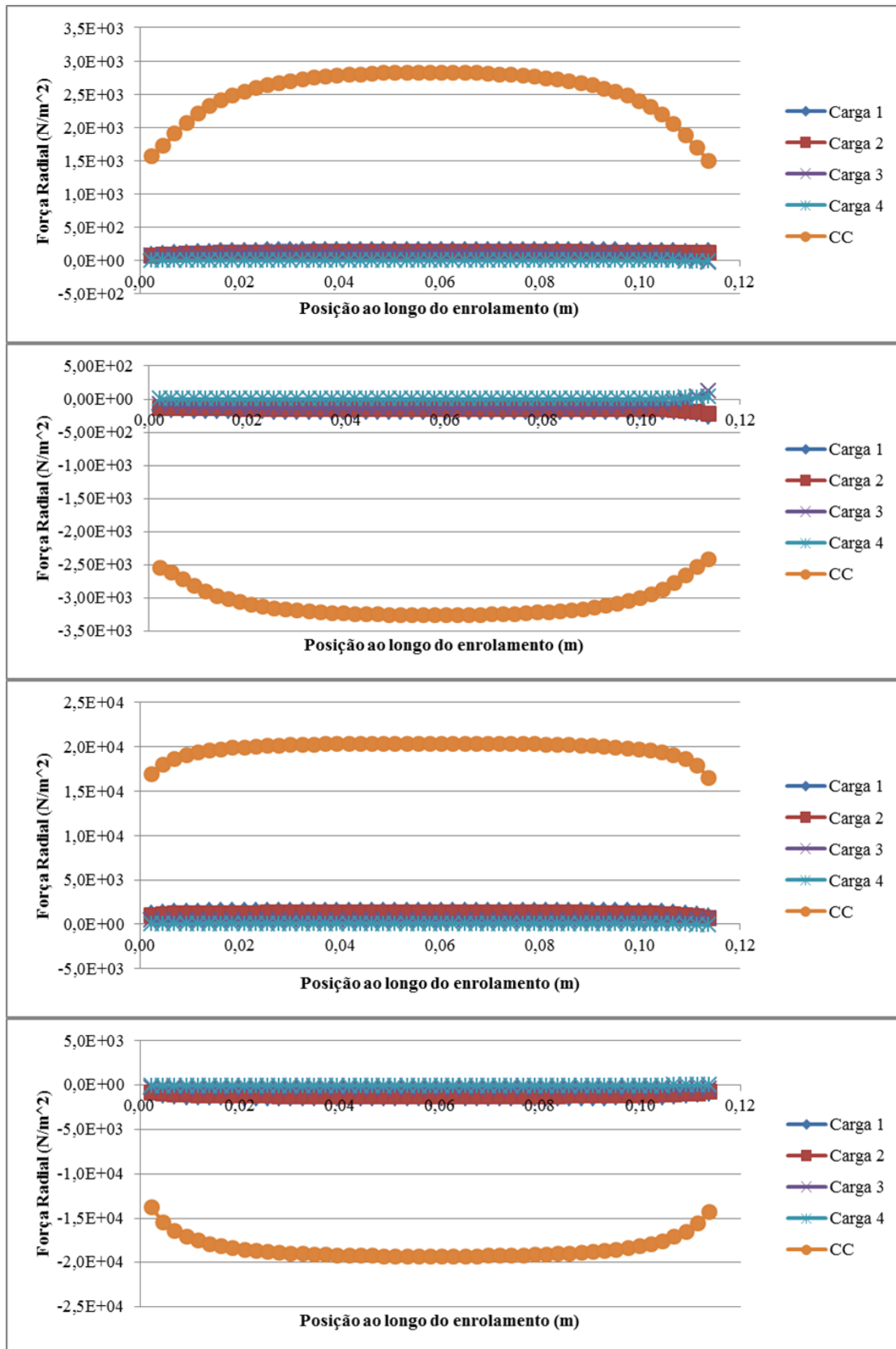


Figura 3.11: Forças Radiais nas regiões dos enrolamentos do transformador supercondutor. De cima para baixo, esquerda do primário, direita do primário, esquerda do secundário e direita do secundário.

Encontram-se representadas em Figura 3.12 e em Figura 3.13 os gráficos das forças axiais presentes nos enrolamentos do transformador convencional e do transformador supercondutor, respectivamente.

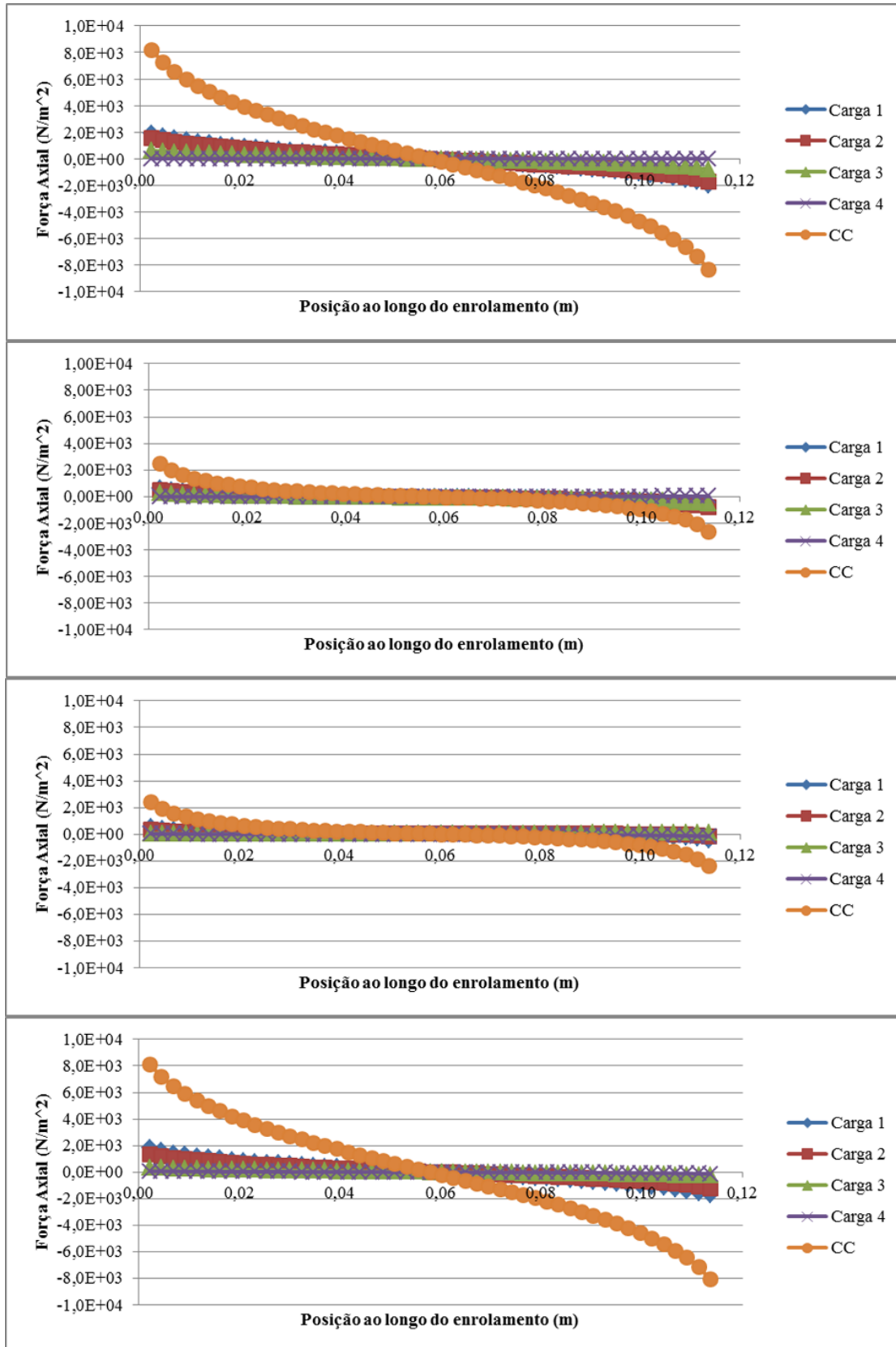


Figura 3.12: Forças Axiais nas regiões dos enrolamentos do transformador convencional. De cima para baixo, esquerda do primário, direita do primário, esquerda do secundário e direita do secundário.

No primário de ambos os protótipos é observado que na região externa à janela do transformador os esforços são relativamente simétricos, isto é, aumenta a sua intensidade consoante exista aproximação dos extremos, mas apresentam sentidos contrários. À direita da bobina em questão, as forças axiais são menos simétricas, i.e., sofrem maior aumento ao se aproximar do extremo superior do enrolamento, incremento que se torna significativo com o aumento da resistência de carga. Para a situação de curto-circuito verifica-se que os esforços axiais no enrolamento primário, para os dois modelos simulados, são aproximadamente 4 vezes maiores na região externa à janela do transformador do que na região interna. E ainda nessa situação verifica-se que os valores das forças são aproximadamente uma ordem de grandeza superior as forças no funcionamento normal.

As curvas das forças axiais presentes no secundário mostram que neste enrolamento também existem as simetrias referenciadas no primário. Isto é, os esforços aumentam consoante a aproximação aos extremos, sendo o incremento mais intensos no extremo superior da região direita do enrolamento. Comparando os valores dos esforços quando existe carga com os que resultam do curto-circuito, verifica-se que existe diferença entre as intensidades das forças, sendo as da falha aproximadamente uma ordem de grandeza superior. Na situação de curto-circuito observa-se que, os esforços axiais no enrolamento secundário do modelo convencional são aproximadamente 4 vezes maiores na região externa à janela do transformador do que na região interna. Já para o transformador supercondutor em curto-circuito verifica-se que estes esforços são aproximadamente o dobro na região externa à janela do transformador do que na região interna.

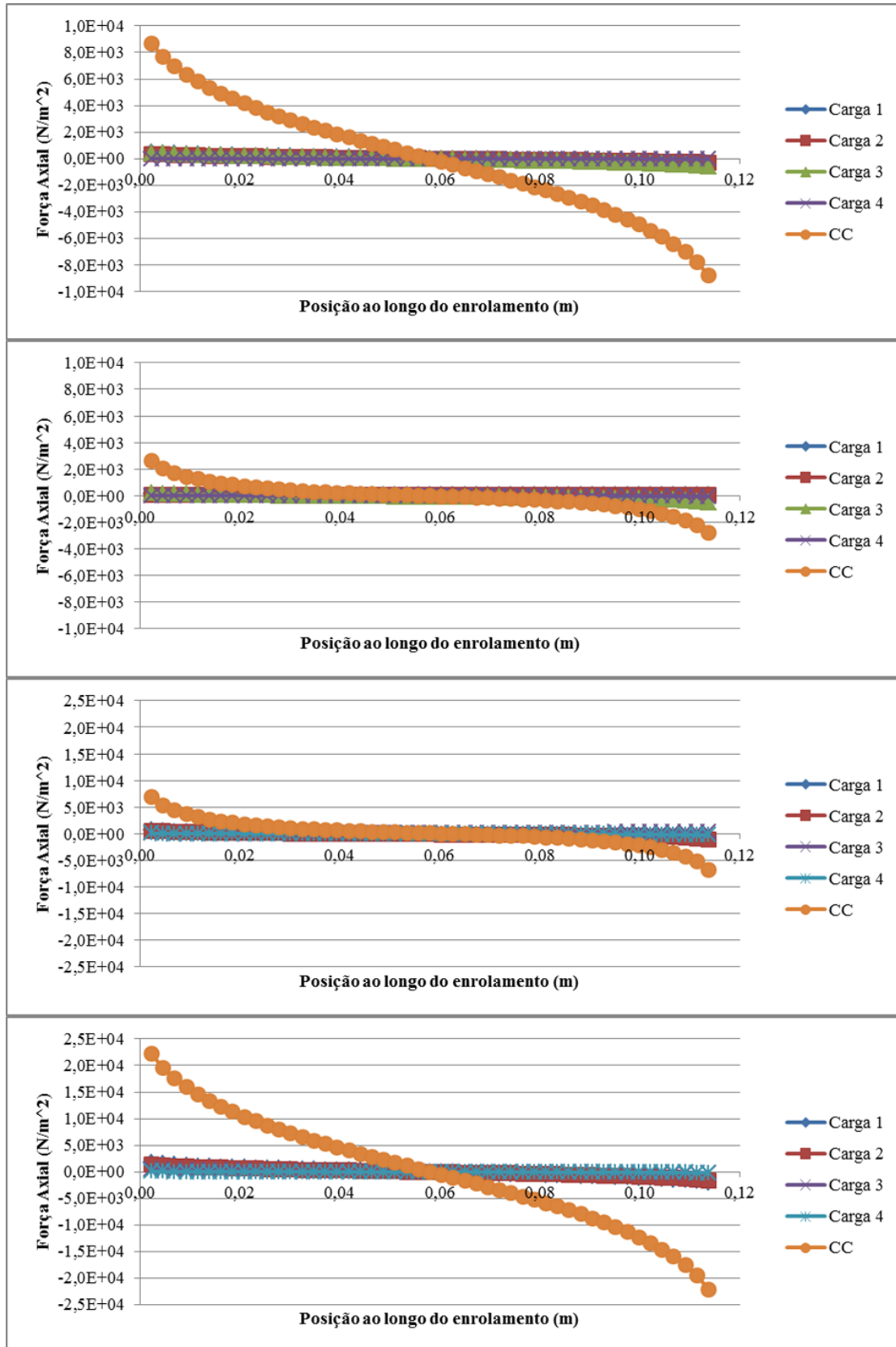


Figura 3.13: Forças Axiais nas regiões dos enrolamentos do transformador supercondutor. De cima para baixo, esquerda do primário, direita do primário, esquerda do secundário e direita do secundário.

Por forma a poder analisar possíveis danos nos enrolamentos provocados pelas tensões mecânicas a que estão sujeitos, é importante comparar os valores obtidos da simulação com os parâmetros de elasticidade característicos dos materiais utilizados. Na Figura 3.14, encontram-se as

curvas de elasticidade típicas para o cobre, Figura 3.14 a), e para compósitos de Bi2223, Figura 3.14 b).

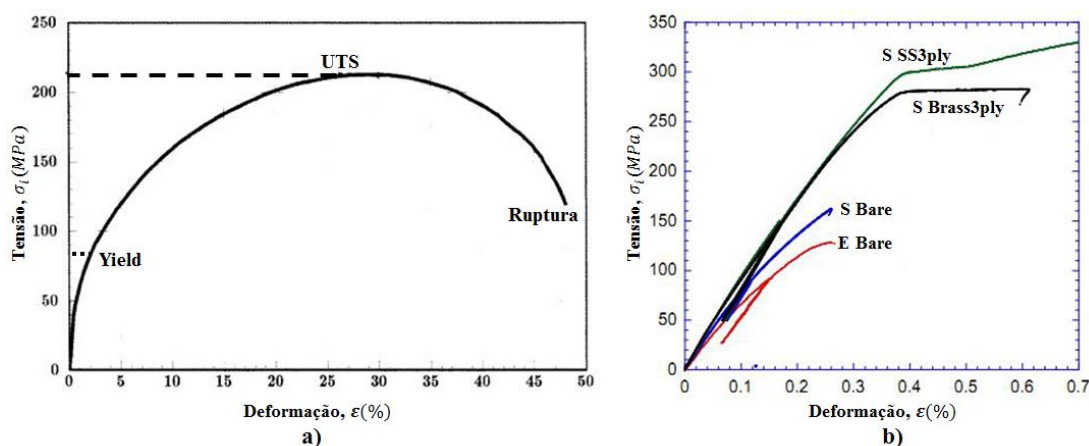


Figura 3.14: Curva de elasticidade. a) Curva para o cobre, adaptado de (Roylance, 2001). b) Curvas para compósitos de Bi2223, adaptado de (Osamura, et al., 2010).

A curva de elasticidade do cobre (Figura 3.14a) apresenta um limite de tensão elástica ou “*Yield Strength*” de aproximadamente 70 MN/m², ponto a partir do qual são produzidas deformações plásticas, ou seja, deformações das quais o material não recupera. Também se verifica um valor de tensão limite de elasticidade ou “*Ultimate Tensile Strength*” (UTS), de aproximadamente 220 MN/m², a partir do qual os danos no material tendem a atingir o ponto de ruptura.

Já na Figura 3.14b, são observados quatro compósitos de BSCCO-Bi2223, o “S SS3ply” e o “S Brass3ply” são fitas laminadas de aço inoxidável e bronze, respectivamente, o “E Bare” é a fita de Bi2223 não laminada, e finalmente o “S Bare” é uma fita não laminada embebida em prata pura e rodeada por ligas de prata. Pode-se observar que nestas fitas o ponto de ruptura do material não se encontra muito longe da UTS, mas que os valores de tensão para os quais as deformações são elásticas podem chegar a ser mais elevados. Visto que são várias as ligas de Bi2223, considera-se nas subsequentes análises, uma fita de Bi-2223/AgMgNi que segundo (Husek, Kovác, & Jones, 2004) parte aquando a deformação esteja entre 0,12% e 0,19%. Assume-se então, como limite de tensão do supercondutor o valor de 112 MN/m², demonstrado na referência como sendo a partir do qual a corrente crítica se degrada.

A Tabela 3.4 mostra os valores de tensão máximos verificados nos enrolamentos, os quais são obtidos no FLUX2D a partir da soma vectorial das forças radial e axial, para a situação de curto-circuito. Apresenta-se também os valores da razão entre a tensão máxima e o limite da tensão elástica ou “*yield*”, em percentagens.

Tabela 3.4: Comparação da tensão mecânica obtida por simulação nos enrolamentos com o limite admissível.

| Secção de Bobina | TC | | TSC | |
|------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|
| | F [kN/m ² ,] | F/yield _c (%) | F [kN/m ² ,] | F/yield _s (%) |
| Esquerda do Primário | 8,444 | 0,012 | 8,942 | 0,013 |
| Direita do Primário | 3,498 | 0,005 | 3,704 | 0,005 |
| Esquerda do Secundário | 3,413 | 0,005 | 20,389 | 0,018 |
| Direita do Secundário | 8,235 | 0,012 | 26,398 | 0,024 |

Conclui-se da Tabela 3.4, que os valores de forças que se manifestam nos enrolamentos de cobre e de material SAT encontram-se bastante distantes dos respectivos limites a partir dos quais perde-se a elasticidade. No caso da fita supercondutora também pode-se concluir que não existe condições visíveis que degradem o material e consequentemente a corrente crítica.

3.2.2 Transformador trifásico de enrolamentos concêntricos

3.2.2.1 Aspectos físicos e modelo de simulação

O modelo de transformador trifásico de enrolamentos concêntricos adoptado nesta dissertação, não é um protótipo existente no laboratório, mas sim uma combinação de aspectos construtivos, baseado nos elementos disponíveis.

O núcleo que compõe este transformador ilustrado na Figura 3.15, tem configuração EI e o material utilizado tem como curva característica a obtida por ensaios em (Vilhena, 2012), representada anteriormente na Figura 3.5. Após verificado que a secção S_{fe} deste núcleo é aproximadamente igual à do núcleo monofásico, e que o cálculo da potência do transformador depende directamente desta, pode-se concluir que este transformador trifásico tem potência aparente ideal, por fase igual, a 1,64 kVA, consequentemente o transformador é de 4,92 kVA. Conclui-se também que o valor da tensão por espira se mantém igual a 0,6 V/espira, assim como os valores nominais por fase, Tabela 3.2.

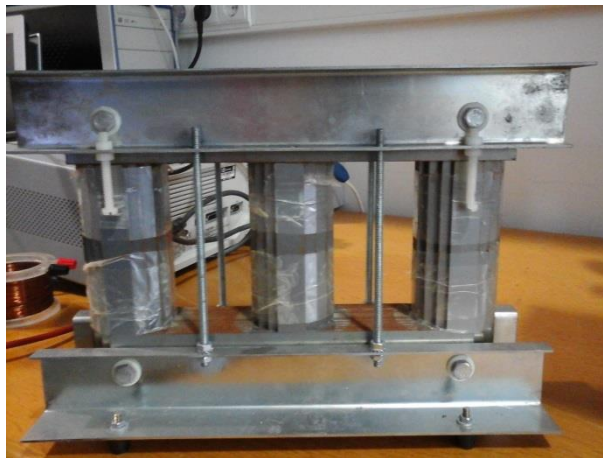


Figura 3.15: Modelo laboratorial de núcleo do transformador.

Os enrolamentos primário e secundário utilizados neste estudo, para cada fase, apresentam iguais características que os utilizados no monofásico, e são dispostos concêntricamente.

No ambiente de simulação, este transformador é representado pela Figura 3.16, que ilustra as suas principais características físicas em 2D e a malha de elementos finitos. O núcleo apresenta as dimensões expostas em [mm] e é composto pelas duas zonas azuis, os enrolamentos primários são modelizados em cor rosa e os secundários em cor vermelho, como sendo cada um composto por duas placas, uma à esquerda e outra à direita. É definida uma profundidade de 60 mm, para efeitos de simulação em 3D. A semelhança do estudo anterior, a malha de elementos finitos é mais fina nas zonas onde as variações dos valores de densidade de fluxo magnético são maiores.

O núcleo utilizado nesta situação é definido também como sendo composto por regiões magnéticas não condutoras de material caracterizado pelo gráfico representado em Figura 3.5.

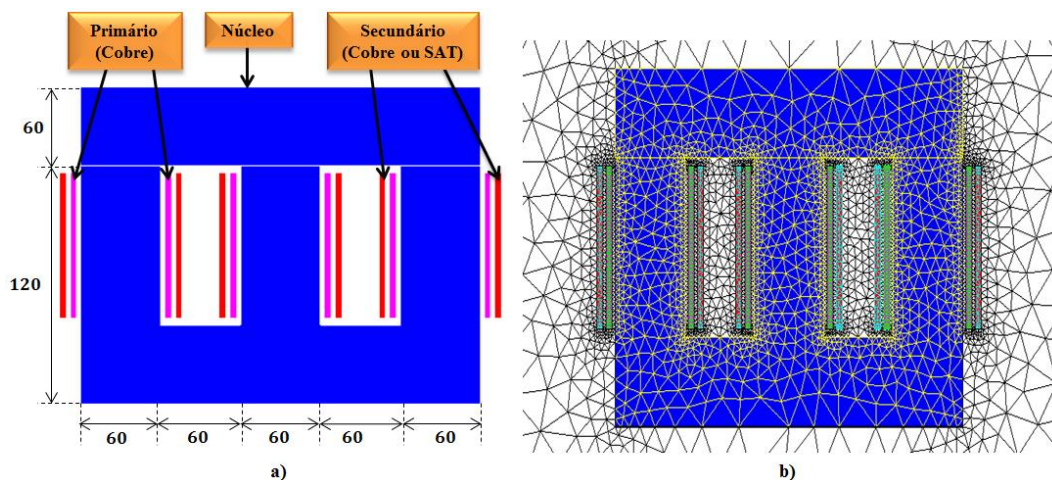


Figura 3.16: a) Modelo de simulação do transformador trifásico. b) Modelo com malha de elementos finitos.

Na primeira disposição estudada deste transformador, isto é, o transformador trifásico convencional, as zonas geométricas relacionadas com os enrolamentos foram definidas como regiões condutoras de cobre. Já para a situação de estudo do transformador trifásico supercondutor, o secundário foi definido como região condutoras de material supercondutor. Os sentidos das correntes nas zonas geométricas esquerdas de cada bobina são contrários aos das zonas à direita, sendo positivos na esquerda e negativos na direita.

Após a análise do transformador convencional e supercondutor, de aspecto físico ideal, são realizados dois estudos em curto-circuito, nos quais existem algumas derivações e/ou deslocações nos enrolamentos. Na situação da Figura 3.17, observa-se que existe uma deslocação axial de aproximadamente 4,54% relativa à posição original nos enrolamentos secundários de cada fase, i.e., os enrolamentos secundários encontram-se no eixo vertical à 5 mm dos primários. Já na Figura 3.18, é mostrado um caso em que existe uma derivação ou *tap* no secundário, de aproximadamente 9,1% do comprimento do enrolamento inicial, ou seja, o secundário tem 10 mm menos de comprimento.

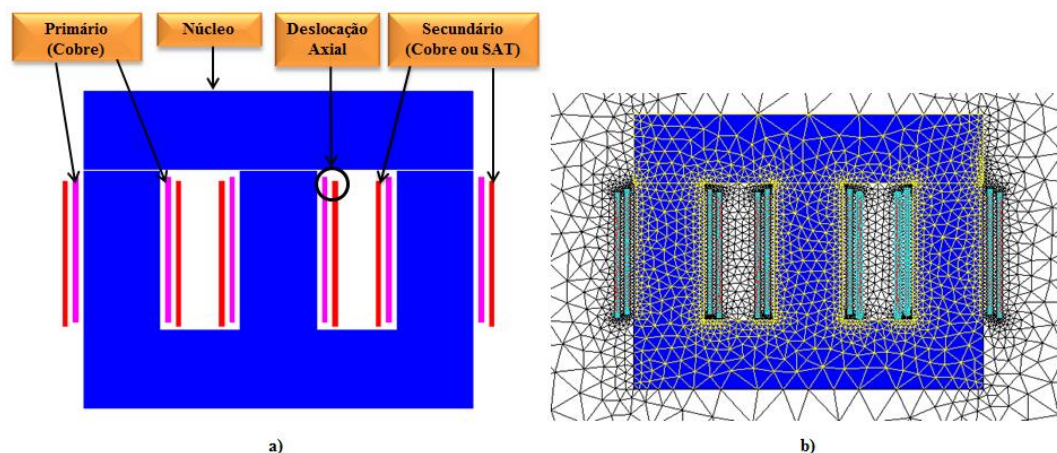


Figura 3.17: a) Modelo de transformador trifásico com deslocação axial do enrolamento. b) Modelo com malha de elementos finitos.

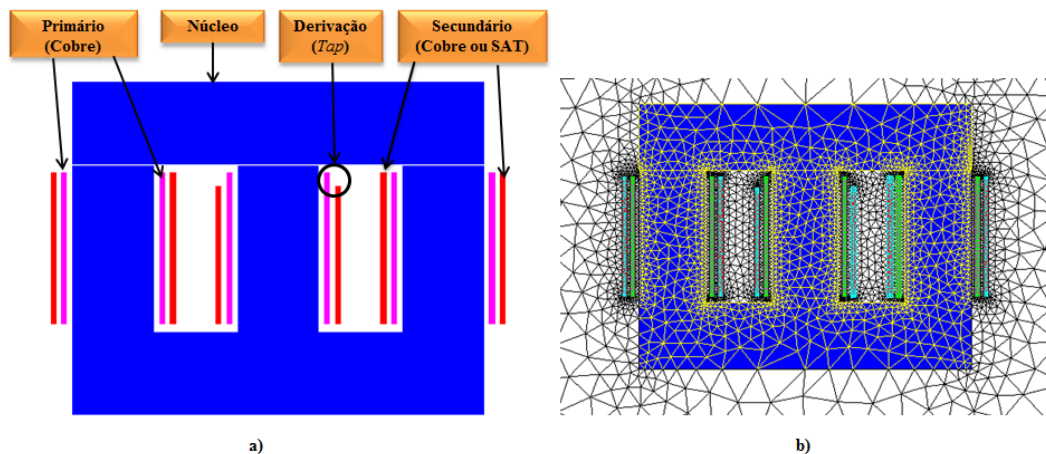


Figura 3.18: a) Modelo de transformador trifásico com derivação no secundário. b) Modelo com malha de elementos finitos.

Os transformadores trifásicos em análise são representados também por um circuito básico, Figura 3.19, em montagem estrela-triângulo, onde podem ser observadas duas bobinas fictícias associadas aos primários ou aos secundários, equivalentes a cada placa do desenho 2D. Existem três conjuntos de resistências, o primeiro associado à impedância da linha (R_{Linha}), o segundo a impedância da carga à qual se encontra ligado o transformador (R_{Carga}) e finalmente uma auxiliar de valor elevado que permite evitar erros no FLUX2D, (R_1). Encontram-se também presentes fontes de alimentação AC, uma por fase, (V_1, V_2, V_3).

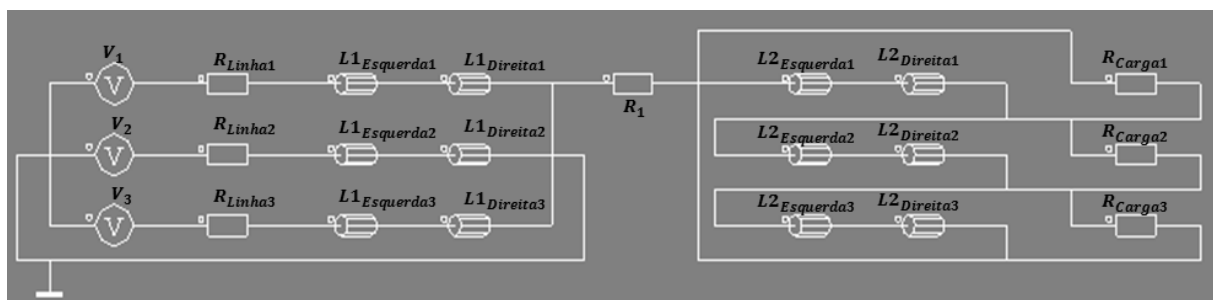


Figura 3.19: Esquema eléctrico do transformador.

Após a definição dos aspectos físicos, pode-se passar a realização das avaliações e análises competentes sobre os esforços no transformador para as diferentes carga e a situação de curto-circuito, realizando uma vez mais distinção entre os efeitos nos enrolamentos de cobre e os supercondutores.

3.2.2.2 Resultados obtidos por simulação

São realizadas em uma primeira fase, simulações com as especificações representadas na Tabela 3.3, assim como para uma resistência de carga de $0,05 \Omega$ utilizada na simulação do curto-circuito, que permitem o estudo das forças nos mesmos estados de funcionamento que o transformador monofásico convencional e supercondutor. Em uma segunda fase são feitas simulações para o transformador trifásico com derivações e com desalinhamentos, sendo possível visualizar os efeitos das forças perante estas modificações.

A semelhança do que acontece na secção 3.2.1.2, as simulações mantêm um passo de 1 ms em um intervalo de 0,5 s, gerando 501 passos. A tensão de entrada aplicada é sinusoidal de forma $u(t) = U_{ef} \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t)$. O curto-circuito simulado neste dispositivo é gerado pelo fecho do interruptor (S_1) em $t = 5$ ms. A análise de resultados é efectuada no instante $t = 0,5$ s, no qual a corrente da primeira fase passa por zero, a da segunda fase encontra-se no máximo negativo e a da terceira fase encontra-se no máximo positivo. É de realçar que assume-se a numeração das fases de esquerda para direita, sendo a primeira fase composta por os enrolamentos concêntricos localizados na coluna esquerda, a segunda pelos enrolamentos dispostos na coluna central e finalmente a terceira à direita.

A Figura 3.20 (a, b, c, d) mostra a distribuição da densidade de fluxo magnético no transformador convencional e no supercondutor, para as situações de plena carga e curto-circuito.

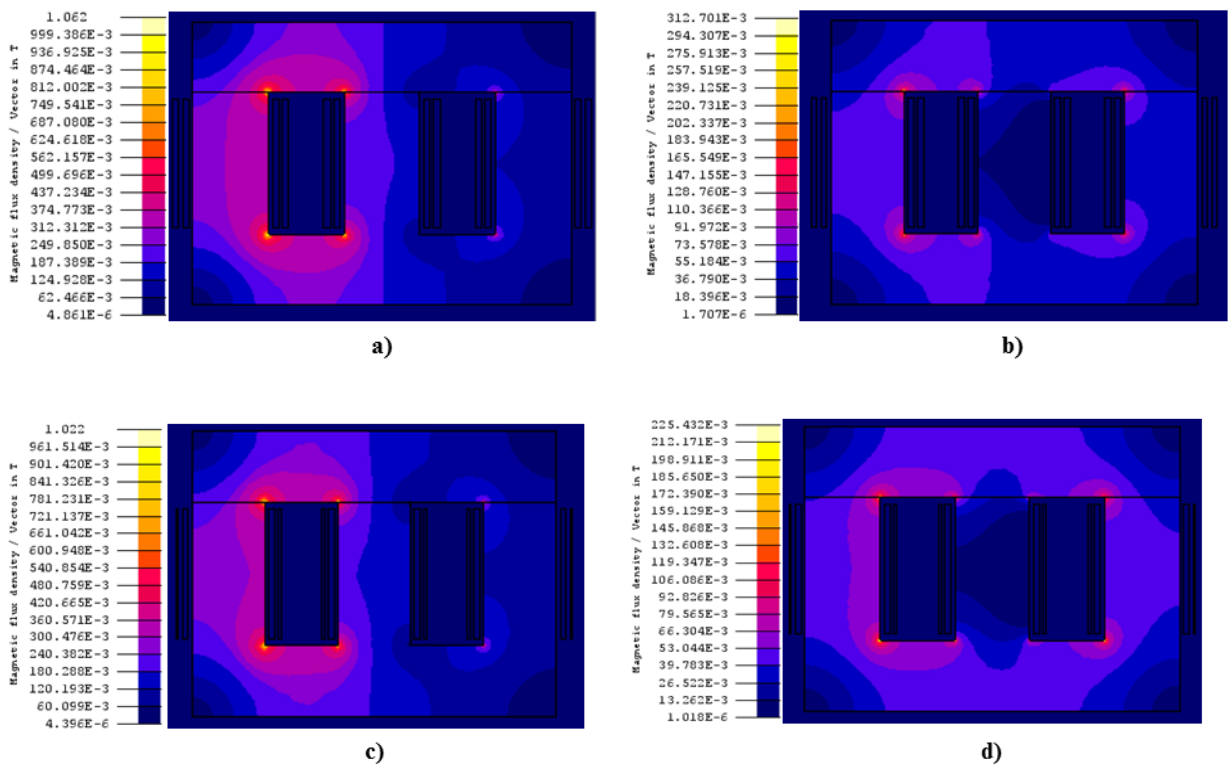


Figura 3.20: Distribuição da densidade de fluxo magnético em transformador trifásico. a) Convencional em funcionamento normal. b) Convencional em CC. c) Supercondutor em funcionamento normal. d) Supercondutor em CC.

De igual forma encontram-se Figura 3.21 (a, b, c, d), as imagens referentes às situações em que existem derivações e/ou desalinhamento, que não apresentam alterações relevantes, somente pequenas variações nos máximos dos valores da indução magnética.

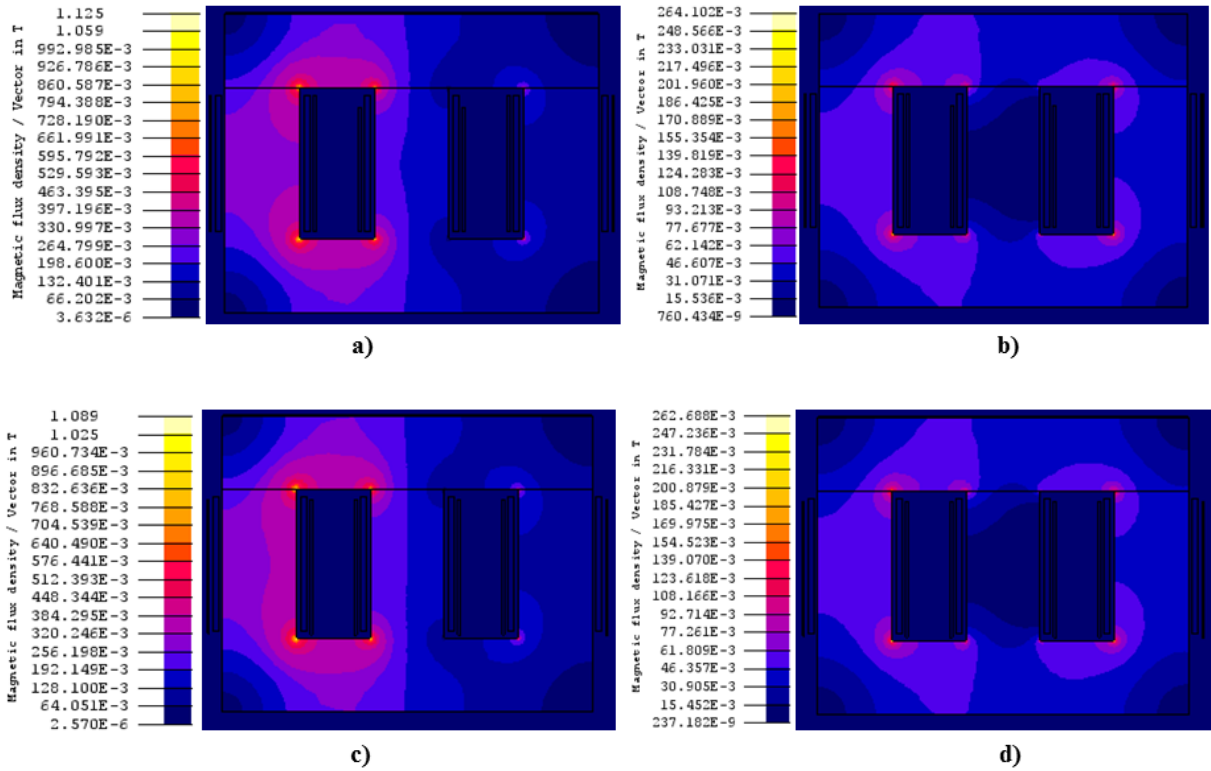


Figura 3.21: Distribuição da densidade de fluxo magnético em transformador trifásico. a) Supercondutor com derivação em funcionamento normal. b) Supercondutor com derivação em CC. c) Supercondutor com deslocação em funcionamento normal. d) Supercondutor com deslocação em CC.

Nos ensaios realizados sobre este transformador trifásico, observa-se que de igual forma que no monofásico, consoante o valor da carga aumenta os valores da densidade de fluxo magnético de dispersão diminuem. Além do anterior, não existem diferenças significativas na gama de valores do campo de indução magnética quando comparados o dispositivo convencional e o supercondutor.

Ilustra-se na Figura 3.22 (a, b, c, d) e Figura 3.23 (a, b, c, d), os vectores que representam a densidade de fluxo magnético de dispersão existente nos enrolamentos. Conclui-se para a situação do transformador sem defeitos, que no instante em análise esta grandeza toma valores superiores na segunda e terceira fase, e ainda mais elevados nos extremos dos enrolamentos, observando-se que não diferem tanto do dispositivo convencional para o supercondutor.

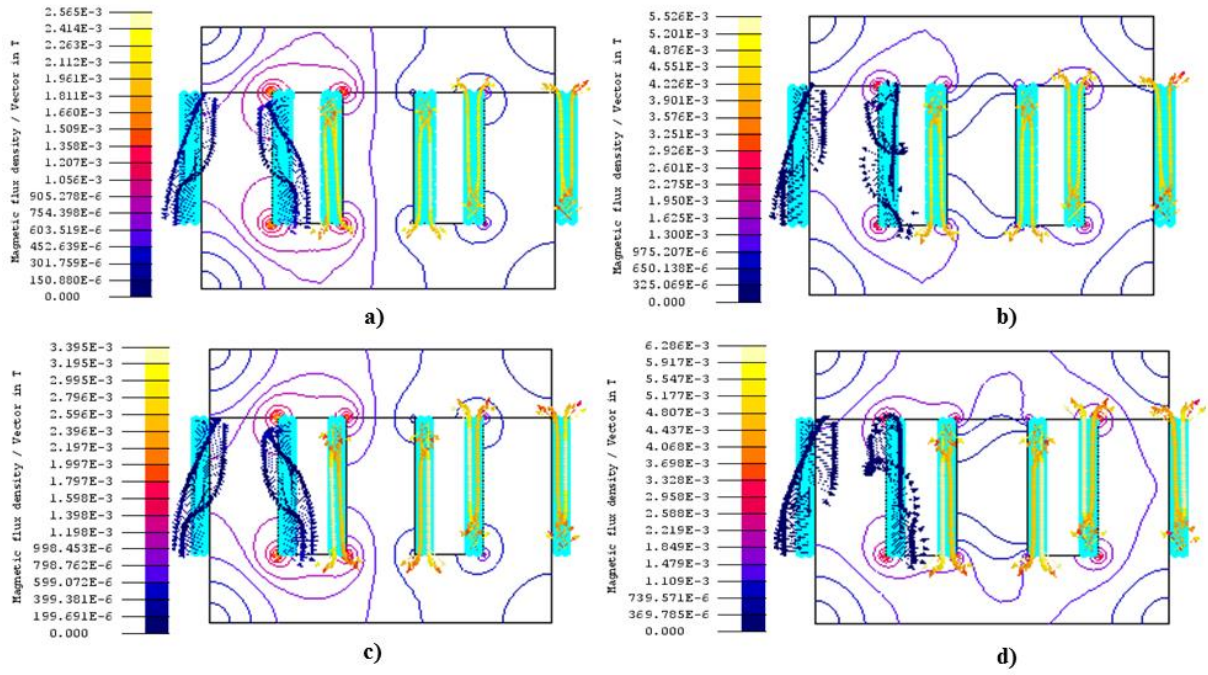


Figura 3.22: Vectors densidade de fluxo magnético de dispersão presentes nos enrolamentos do transformador trifásico. a) Convencional em funcionamento normal. b) Convencional em CC. c) Supercondutor em funcionamento normal. d) Supercondutor em CC.

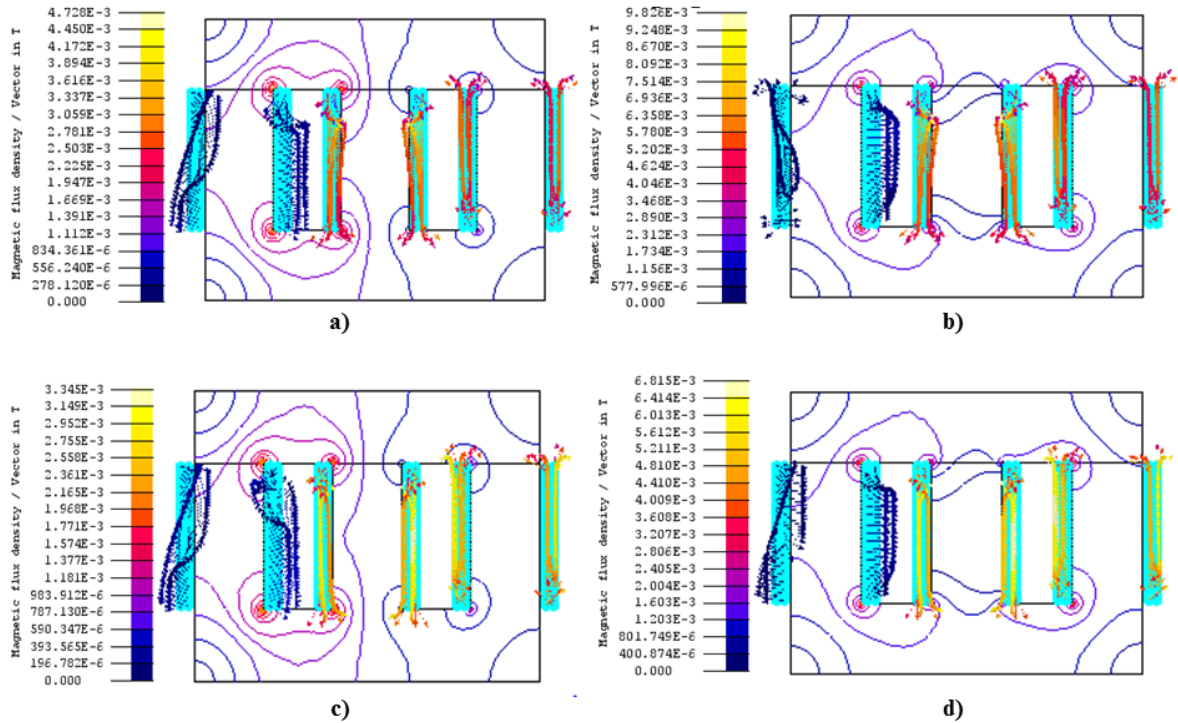


Figura 3.23: Vectors densidade de fluxo magnético de dispersão presentes nos enrolamentos do transformador trifásico. a) Supercondutor com derivação em funcionamento normal. b) Supercondutor com derivação em CC. c) Supercondutor com deslocação em funcionamento normal. d) Supercondutor com deslocação em CC.

Enquanto às situações em que existem irregularidades, representadas acima em Figura 3.23, observa-se que o comportamento dos vectors apresenta semelhanças ao do transformador em boas condições. Mas no caso do transformador com derivação existe um aumento na intensidade da

densidade de fluxo magnético de dispersão nos enrolamentos, isto é, os máximos são incrementados em valor de aproximadamente $\frac{1}{2}$ do máximo para o transformador original.

São mostrados nas Figura 3.24 (a, b, c, d) e Figura 3.25 (a, b, c, d), os vectores das forças presentes nas bobinas do transformador trifásico. É possível observar em Figura 3.24, que os valores das forças existentes na primeira fase são relativamente baixos, quando comparados aos das duas fases à direita, que em módulo, rondam as poucas dezenas de milhar de N/m^3 . Comprova-se a estreita relação entre as linhas do campo de indução magnético de dispersão e os esforços, visto que as intensidades destes variam nos enrolamentos consoante a variação dos valores das densidades de fluxo de dispersão. Confirma-se que para a disposição dos enrolamentos de forma concêntrica, as forças nos enrolamentos internos tem tendência a dirigir-se para o interior da bobina, compressão, enquanto as forças na bobina externa direccionam-se para fora da circunferência, expansão. Também das simulações com o transformador supercondutor pode-se visualizar que os esforços nos enrolamentos primários, de cobre, são inferiores aos sentidos pelos enrolamentos de SAT. Retira-se do ensaio em curto-circuito que a corrente à que está submetido o transformador nesta situação, representa aproximadamente $\frac{I_{cc}}{I_N} (\%) \cong 208\%$ da corrente nominal, e consequentemente existe um significativo acréscimo nos valores das forças.

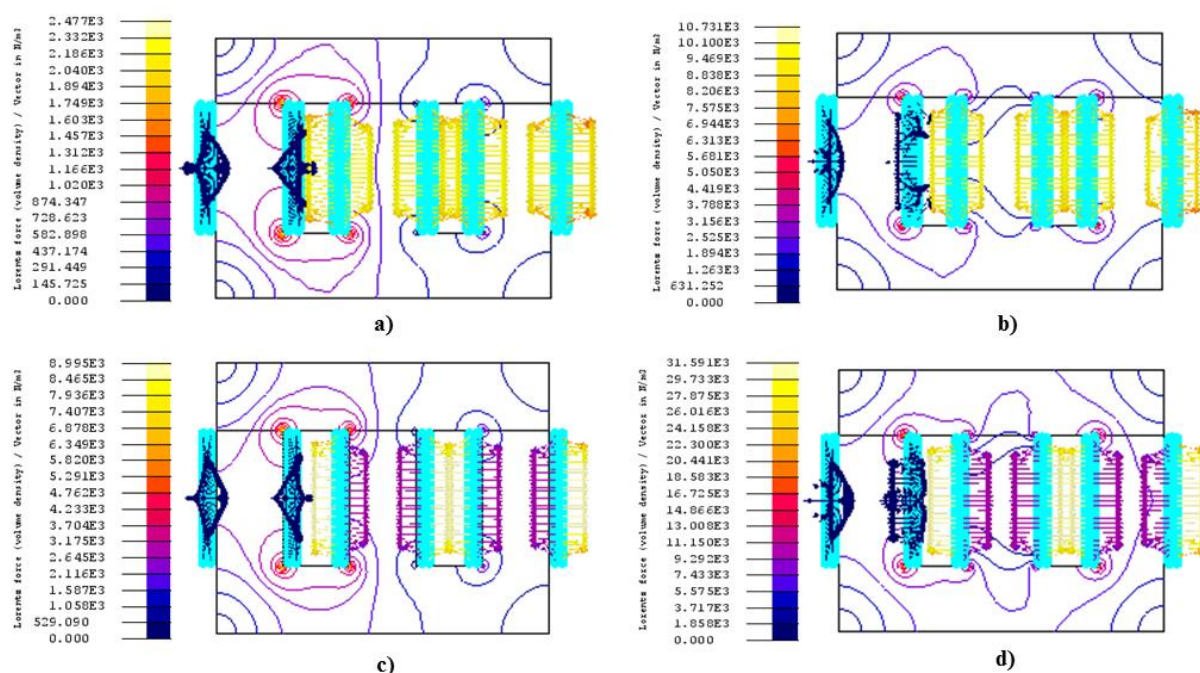


Figura 3.24: Vectores de força presentes nos enrolamentos do transformador trifásico. a) Convencional em funcionamento normal. b) Convencional em CC. c) Supercondutor em funcionamento normal. d) Supercondutor em CC.

Já em Figura 3.25, observa-se que muitas das conclusões retiradas do transformador sem irregularidades mantem-se, nomeadamente, o comportamento geral das forças por fase e as relações dos esforços entre primários e secundários. Mas também é apreciável que perante o desalinhamento imposto, não existe muita diferença nas forças, quando comparado ao transformador inicial. Contudo, na situação de derivação, verifica-se um aumento nos esforços do enrolamento modificado.

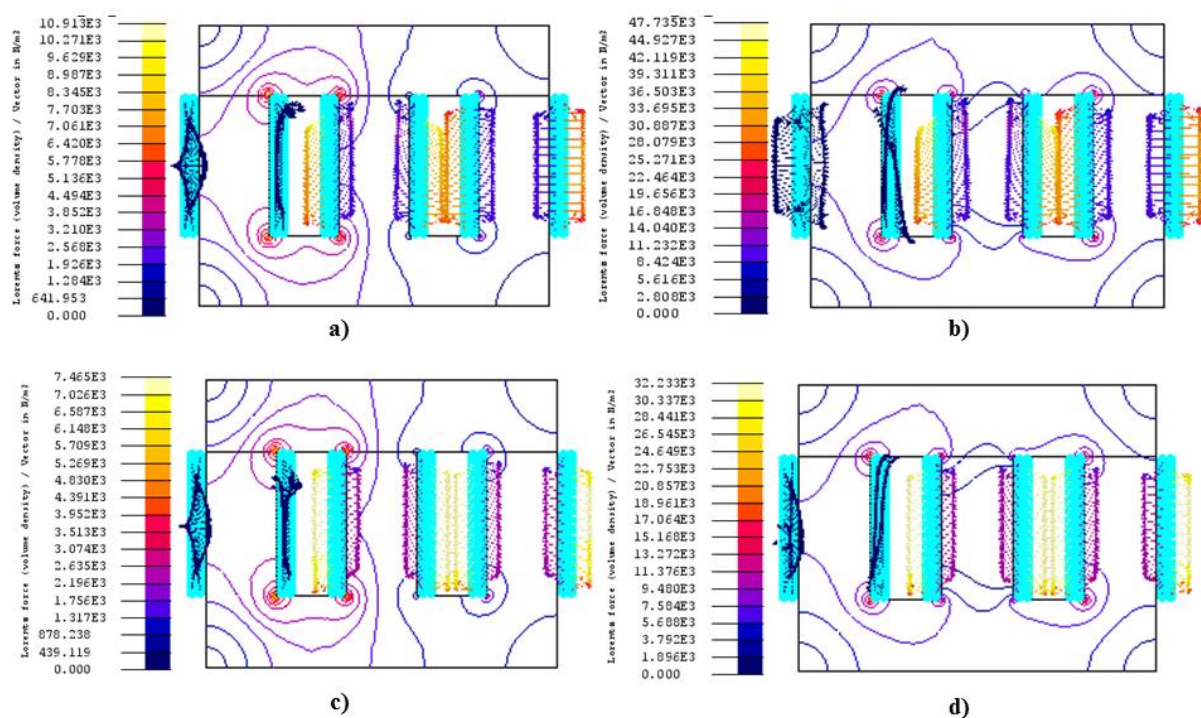


Figura 3.25: Vectors de força presentes nos enrolamentos do transformador trifásico. a) Supercondutor com derivação em funcionamento normal. b) Supercondutor com derivação em CC. c) Supercondutor com deslocação em funcionamento normal. d) Supercondutor com deslocação em CC.

Transformador trifásico convencional e supercondutor sem irregularidades ou “ideal”

Seguidamente são ilustrados em Figura 3.26-3.27, os gráficos das forças radiais e axiais existentes nos enrolamentos do transformador convencional e do supercondutor para os diferentes valores de carga. De igual forma que no transformador monofásico assume-se como origem de referencial o extremo inferior dos enrolamentos.

Observa-se na Figura 3.26 e na Figura 3.27, que os enrolamentos primários das primeiras fases do TC e do TSC, apresentam forças radiais com comportamentos idênticos, isto é, em curto-circuito os valores de força são ínfimos, e crescem com a diminuição da carga utilizada em cada ensaio. Também é visível que as intensidades são superiores nos extremos das regiões que representam os enrolamentos, regiões interna e externa à janela do transformador.

Nos enrolamentos secundários de ambos os dispositivos, verifica-se a existência de semelhança nas curvas de forças, diferindo nas intensidades dos esforços que no transformador supercondutor são aproximadamente o dobro das existentes no transformador convencional. Contudo, nos dois transformadores as forças assumem valores relativamente mais elevados ao longo da altura do enrolamento

As forças radiais na primeira fase mostram efeitos de tracção no enrolamento interno e de compressão no externo, os quais são contrários ao esperado.

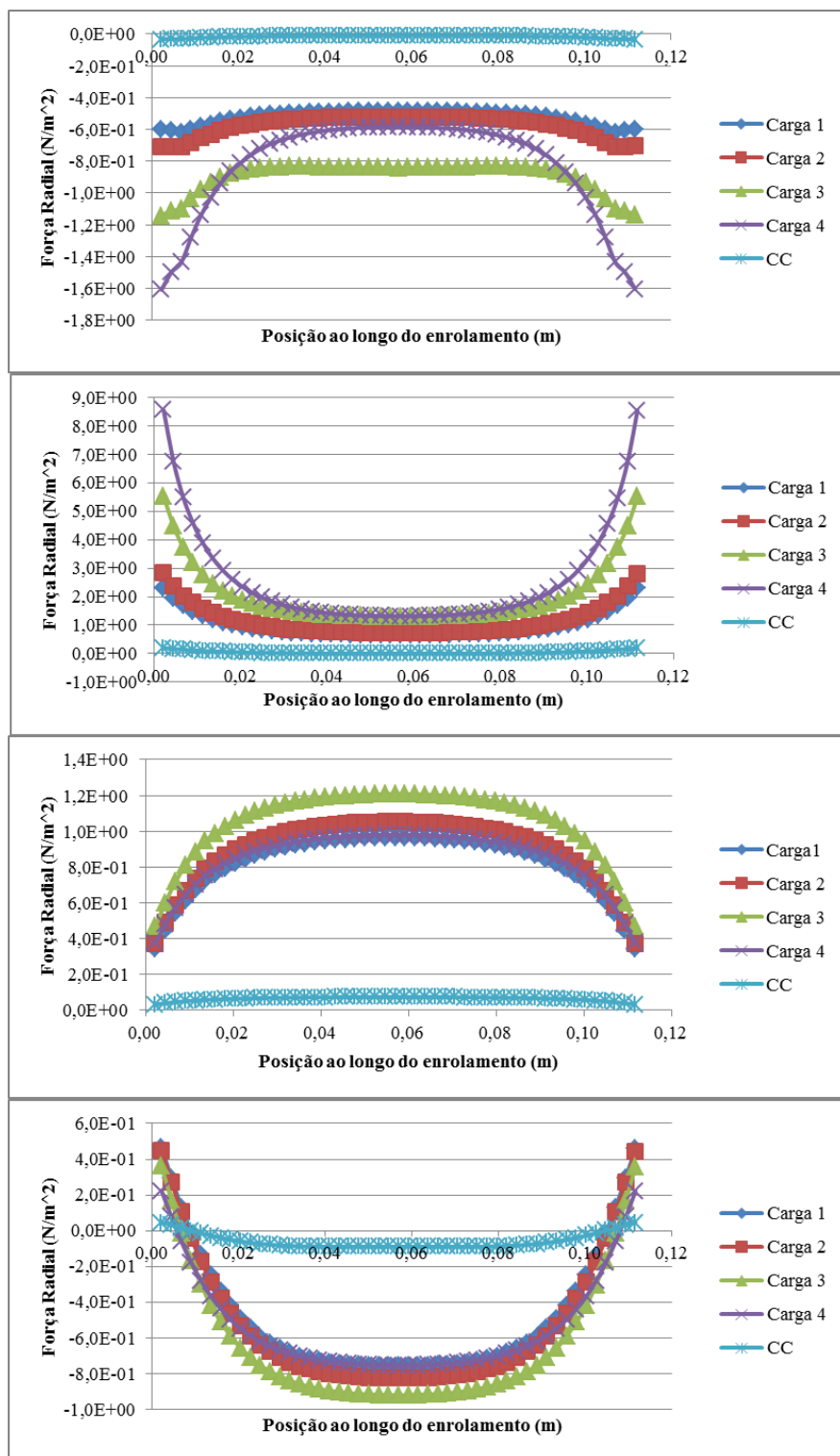


Figura 3.26: Forças Radiais nas regiões dos enrolamentos da primeira fase do transformador convencional. De cima para baixo, esquerda do primário, direita do primário, esquerda do secundário e direita do secundário.

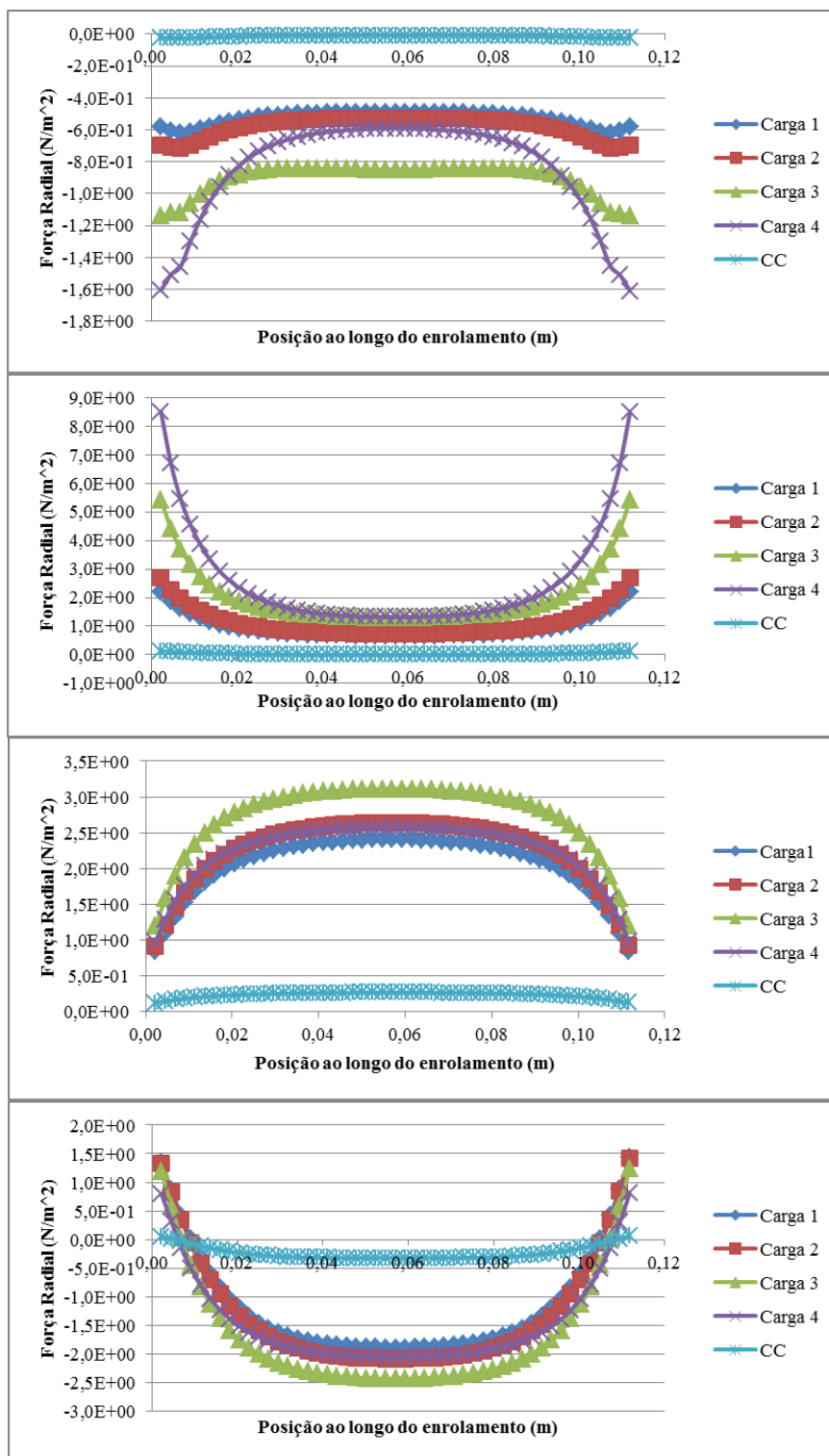


Figura 3.27: Forças Radiais nas regiões dos enrolamentos da primeira fase do transformador supercondutor. De cima para baixo, esquerda do primário, direita do primário, esquerda do secundário e direita do secundário.

Ilustra-se na Figura 3.28 e na Figura 3.29 o comportamento das forças radiais nos enrolamentos das segundas fases dos dois transformadores em estudo. Os primários da fase em questão, possuem parecenças a nível de forma e intensidade, com valores máximos ao longo da altura das bobinas. Contrariamente ao que acontece na primeira fase, verifica-se que os esforços aumentam com o aumento da carga, ou seja, com a aproximação à situação de curto-circuito, em que os esforços quadruplicam em relação aos existentes em carga nominal.

As curvas que representam os esforços radiais nos enrolamentos secundários, mostram que no transformador convencional as magnitudes das forças radiais têm igual valor às do primário mas os efeitos são contrários, isto é, o secundário sofre forças de tracção enquanto que o primário sofre forças de compressão. Para o modelo supercondutor os efeitos são da mesma natureza mas as intensidades triplicam em relação ao TC.

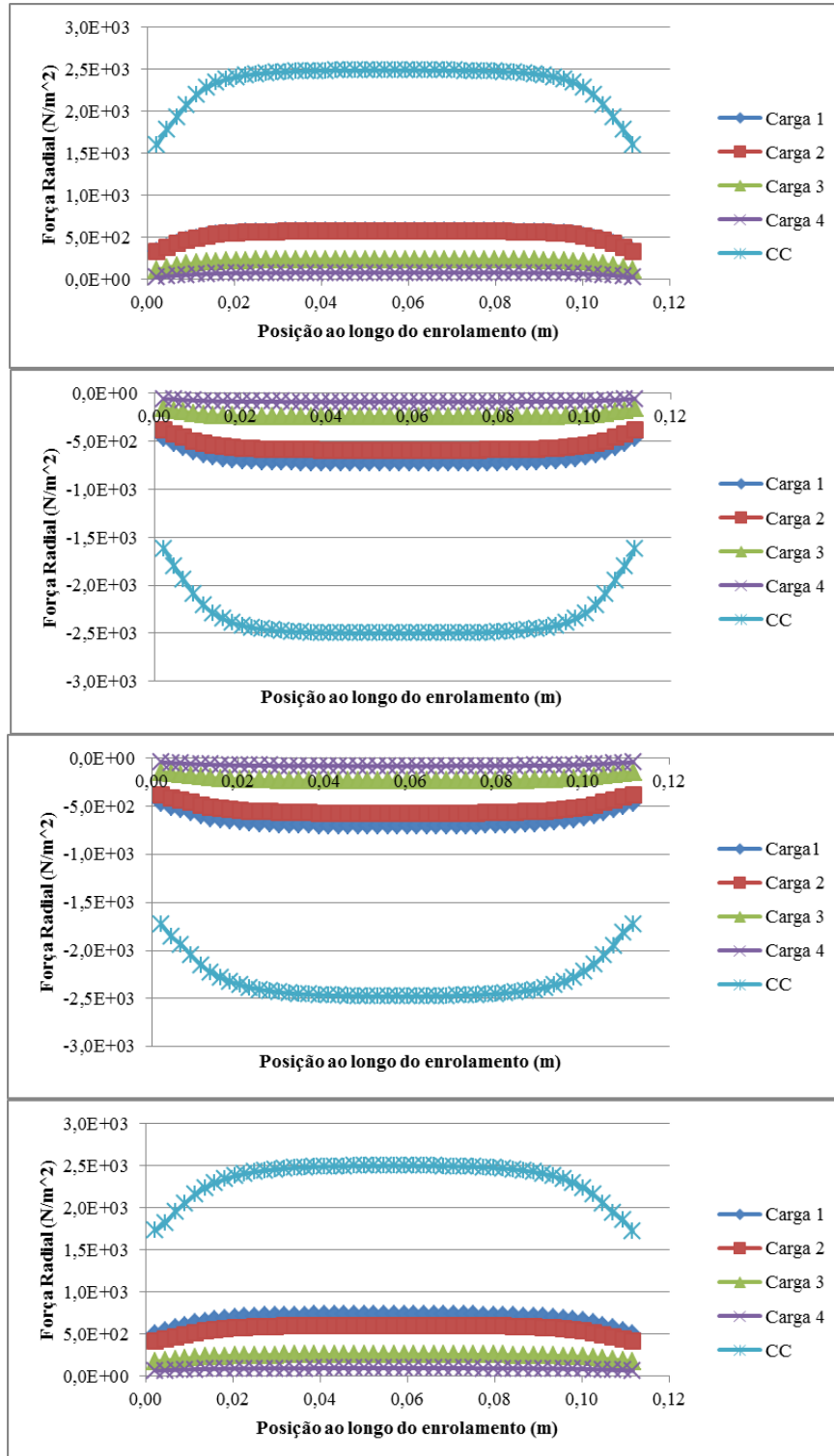


Figura 3.28: Forças Radiais nas regiões dos enrolamentos da segunda fase do transformador convencional. De cima para baixo, esquerda do primário, direita do primário, esquerda do secundário e direita do secundário.

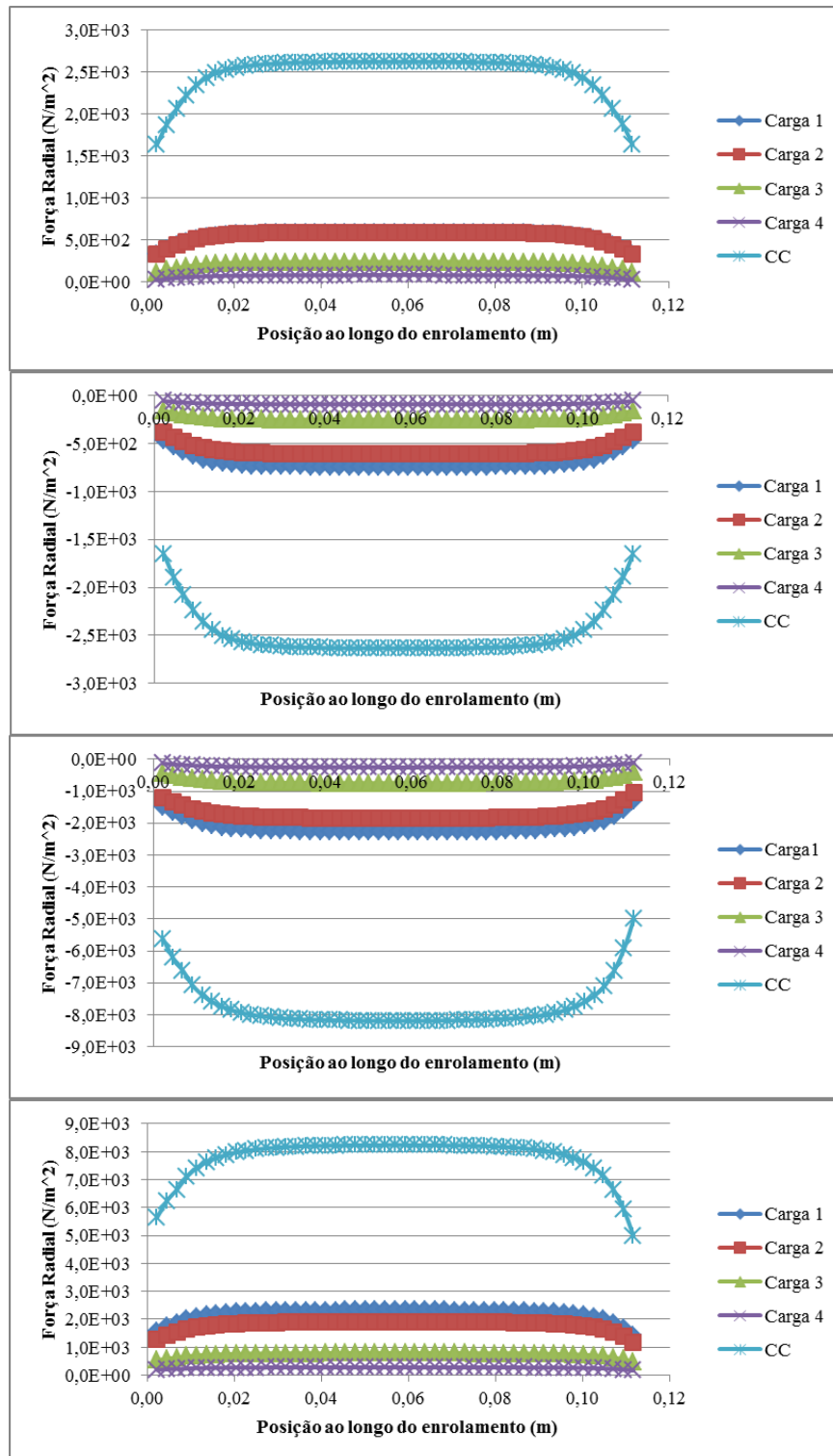


Figura 3.29: Forças Radiais nas regiões dos enrolamentos da segunda fase do transformador supercondutor. De cima para baixo, esquerda do primário, direita do primário, esquerda do secundário e direita do secundário.

Na Figura 3.30 e na Figura 3.31 encontram-se representadas as forças radiais para os enrolamentos da terceira fase do transformador convencional e do supercondutor. Verifica-se que estas forças apresentam características de comportamento idênticas às das forças existentes nos enrolamentos da segunda fase.

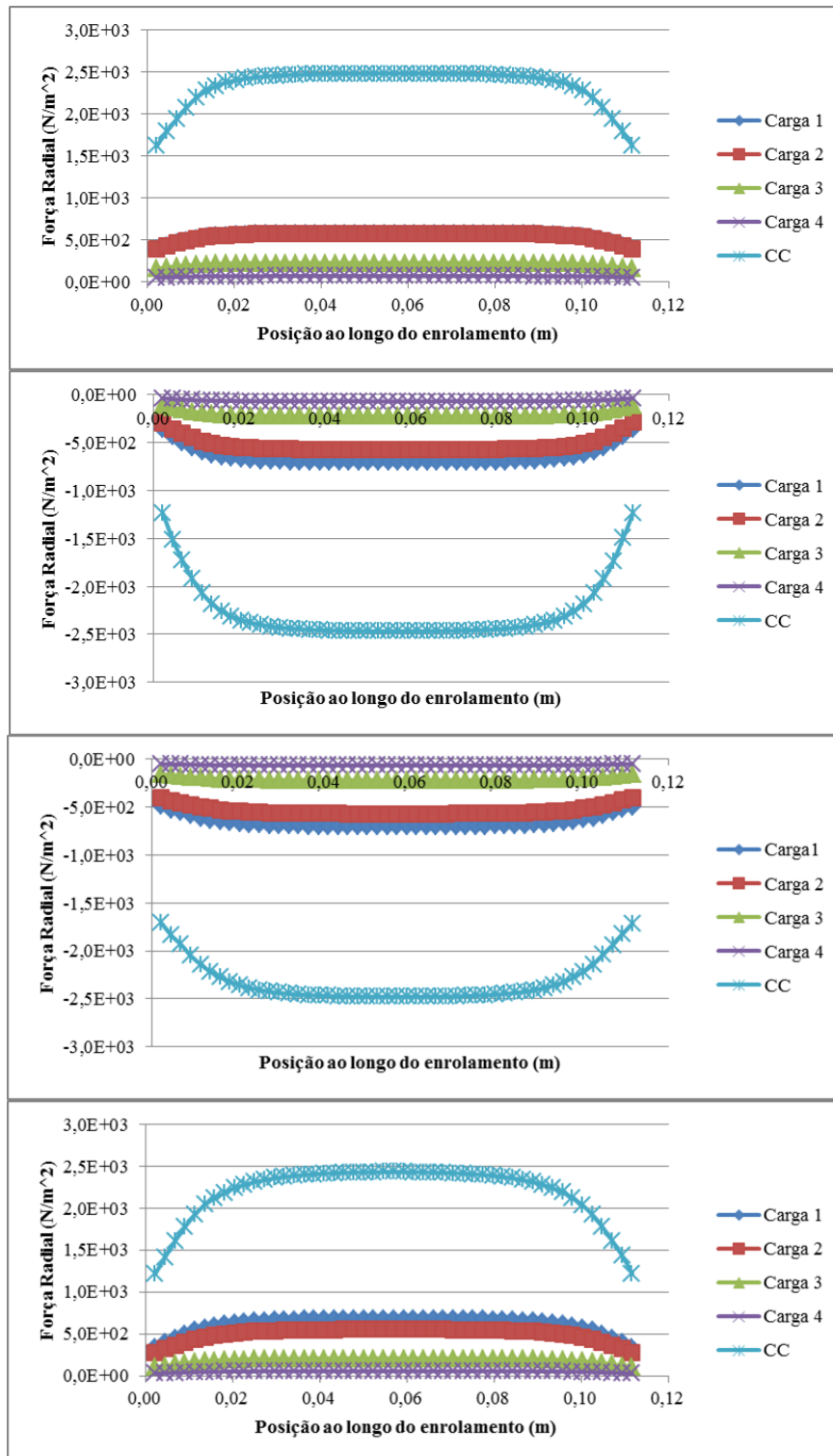


Figura 3.30: Forças Radiais nas regiões dos enrolamentos da terceira fase do transformador convencional. De cima para baixo, esquerda do primário, direita do primário, esquerda do secundário e direita do secundário.

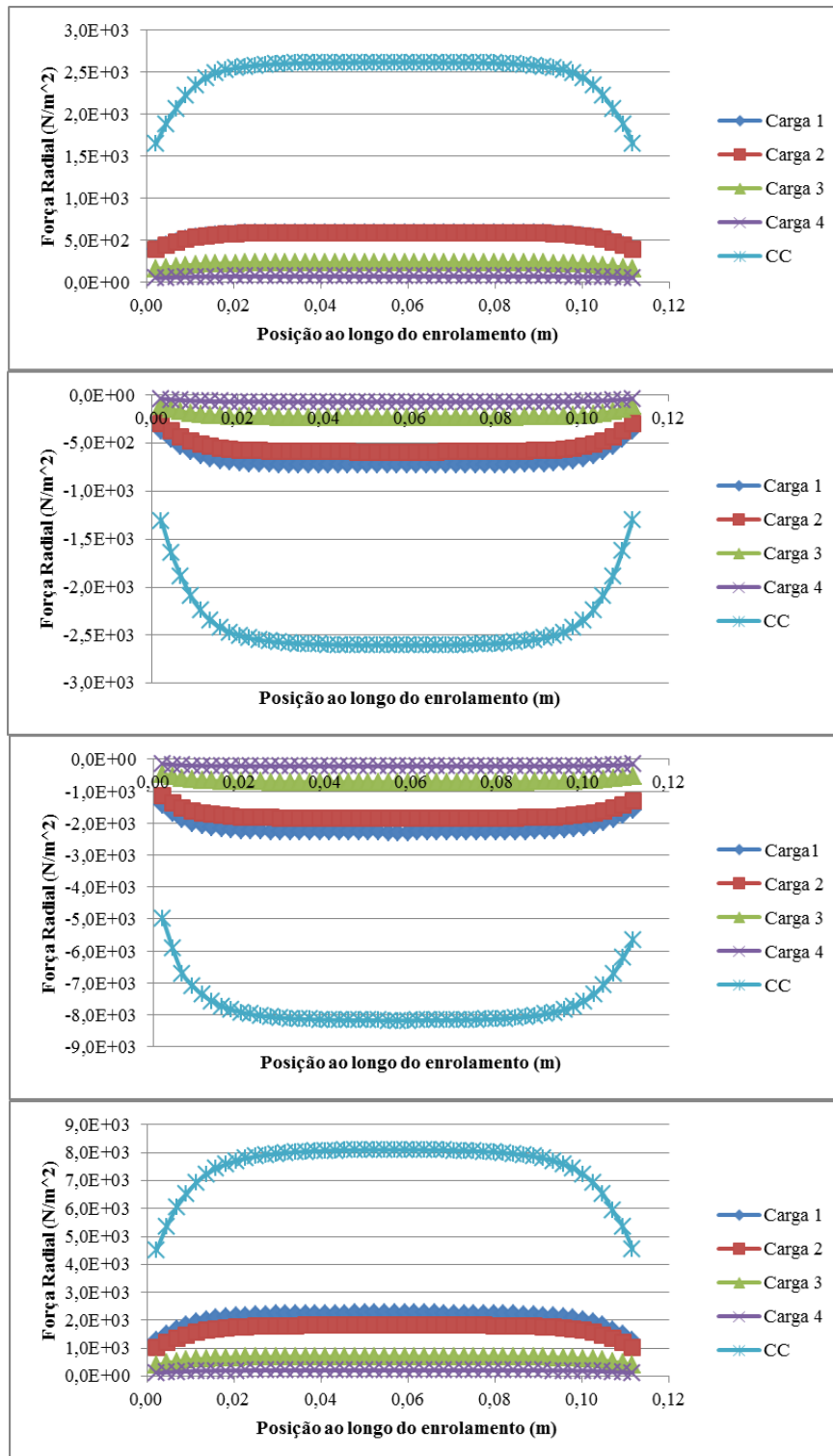


Figura 3.31: Forças Radiais nas regiões dos enrolamentos da terceira fase do transformador supercondutor. De cima para baixo, esquerda do primário, direita do primário, esquerda do secundário e direita do secundário.

Podem ser observadas na Figura 3.32 e Figura 3.33, as curvas que representam as forças axiais ao longo das bobinas da primeira fase do transformador convencional e do supercondutor. Nos enrolamentos primários de ambos dispositivos, confirma-se que os esforços axiais são mais intensos nas extremidades dos enrolamentos, região na qual existe maior quantidade de campo de indução magnético a descompor-se. Estes máximos aumentam, nos dois modelos, consoante seja diminuído o valor da carga, e portanto os esforços são insignificantes no curto-circuito, inferiores em aproximadamente duas ordens de grandeza.

De igual forma que nos enrolamentos primários, nos secundários os máximos das forças encontram-se nos extremos das bobinas. Nestes enrolamentos se observa que nos ensaios com carga existe pouca variação entre as curvas, ou seja, os esforços axiais para as quatro cargas exibem valores parecidos. Verifica-se que os esforços nas duas regiões do secundário do TC representam aproximadamente um terço dos esforços no TSC. Também na situação de curto-circuito não são apreciadas muitas diferenças entre os esforços no primário e o secundário, assim como relativamente aos esforços no transformador supercondutor.

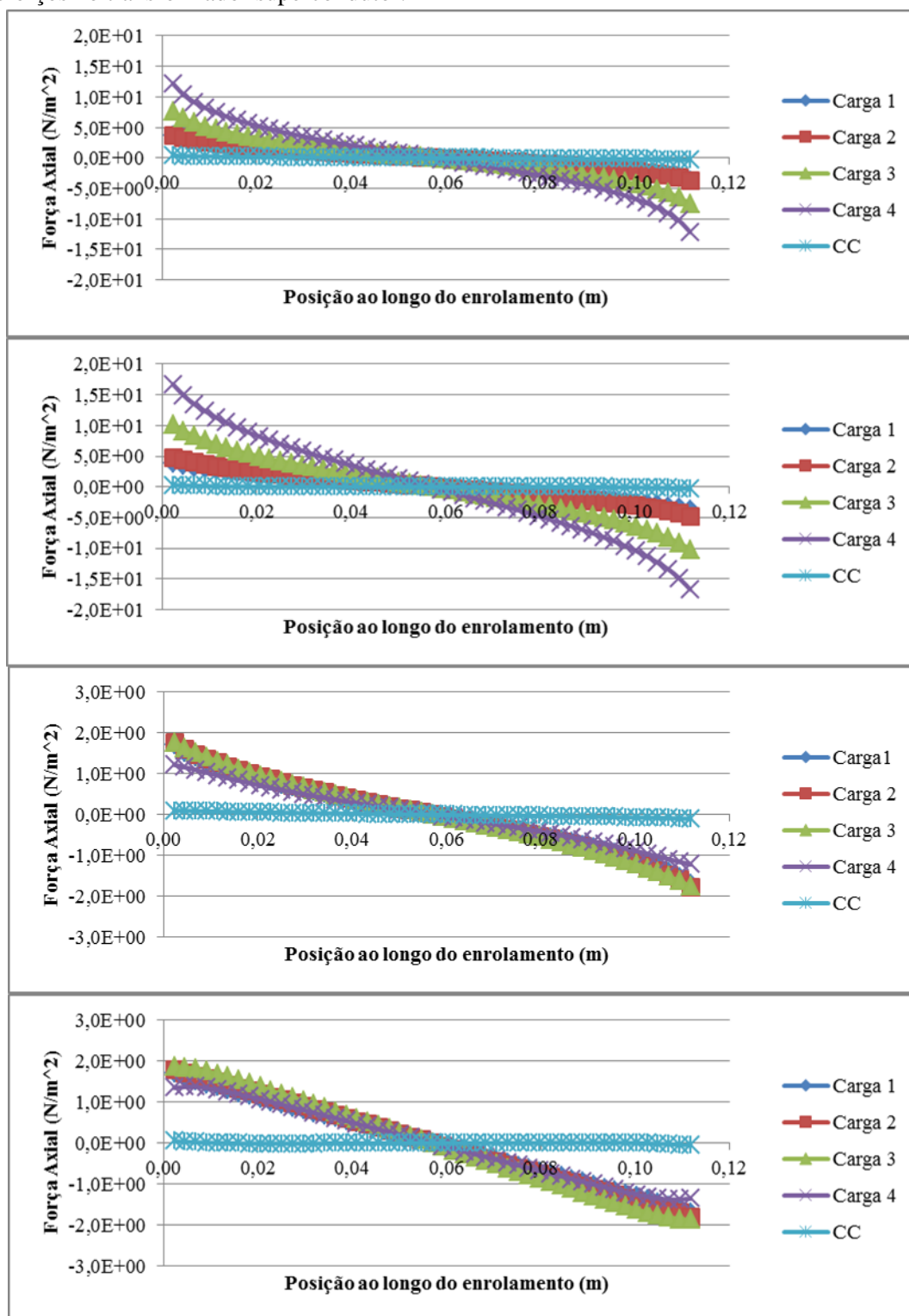


Figura 3.32: Forças Axiais nas regiões dos enrolamentos da primeira fase do transformador convencional. De cima para baixo, esquerda do primário, direita do primário, esquerda do secundário e direita do secundário.

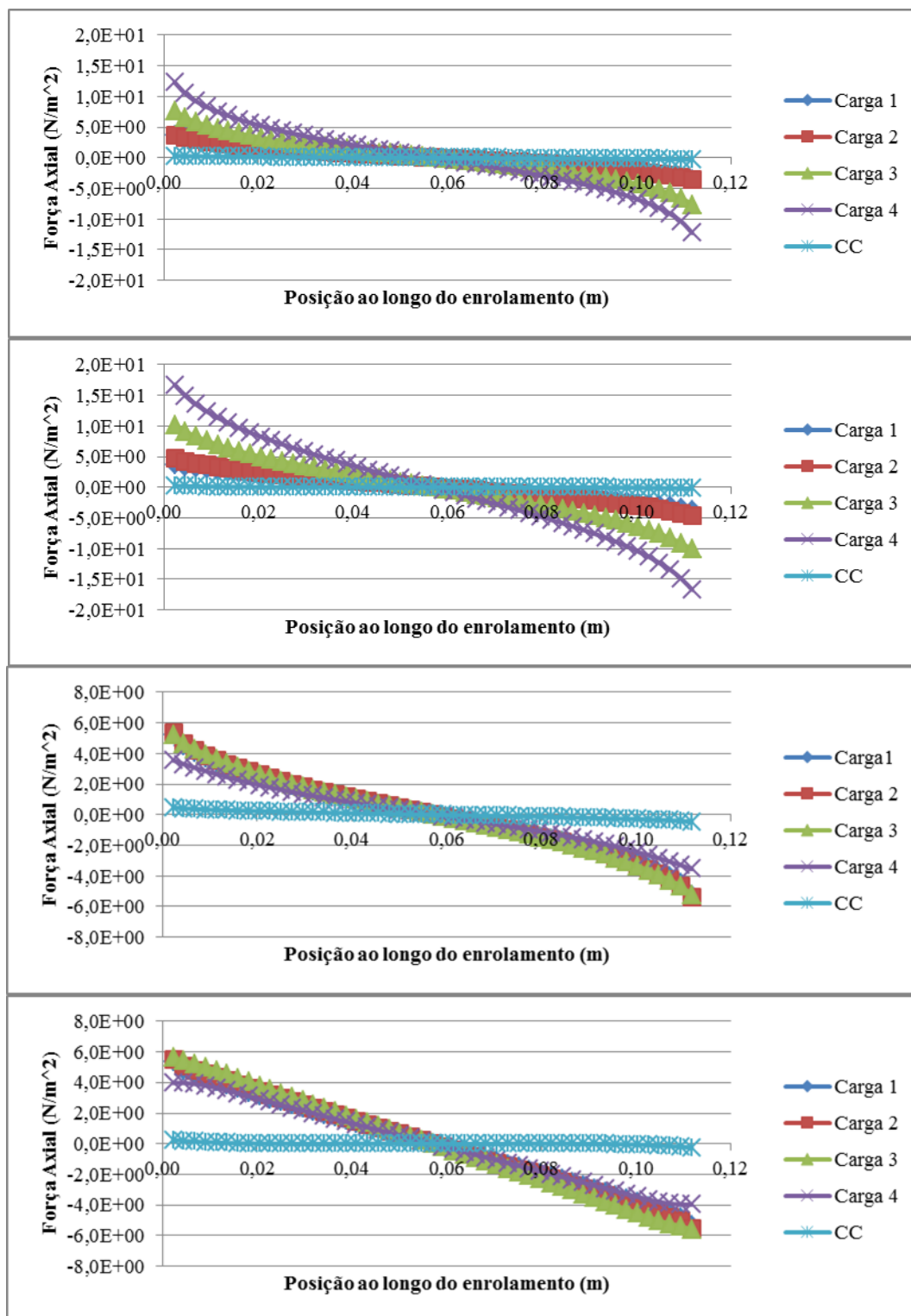


Figura 3.33: Forças Axiais nas regiões dos enrolamentos da primeira fase do transformador supercondutor. De cima para baixo, esquerda do primário, direita do primário, esquerda do secundário e direita do secundário.

As forças axiais nos enrolamentos da segunda fase, ilustrados em Figura 3.34 e Figura 3.35, caracterizam-se por ter relativamente pouca variação nas curvas para os ensaios realizados com cargas. Sobre os enrolamentos primários pode-se concluir que mesmo exibindo-se maiores intensidades das forças nos extremos das bobinas, para todos os ensaios, em curto-circuito estes valores aumentam uma ordem de grandeza em relação às simulações em carga.

Enquanto ao enrolamento secundário do transformador convencional, verifica-se que estes têm características idênticas às do primário, mas em relação ao secundário do transformador supercondutor, as forças resultantes das simulações em carga são aproximadamente uma ordem de grandeza inferior e os esforços em curto-circuito são aproximadamente um terço.

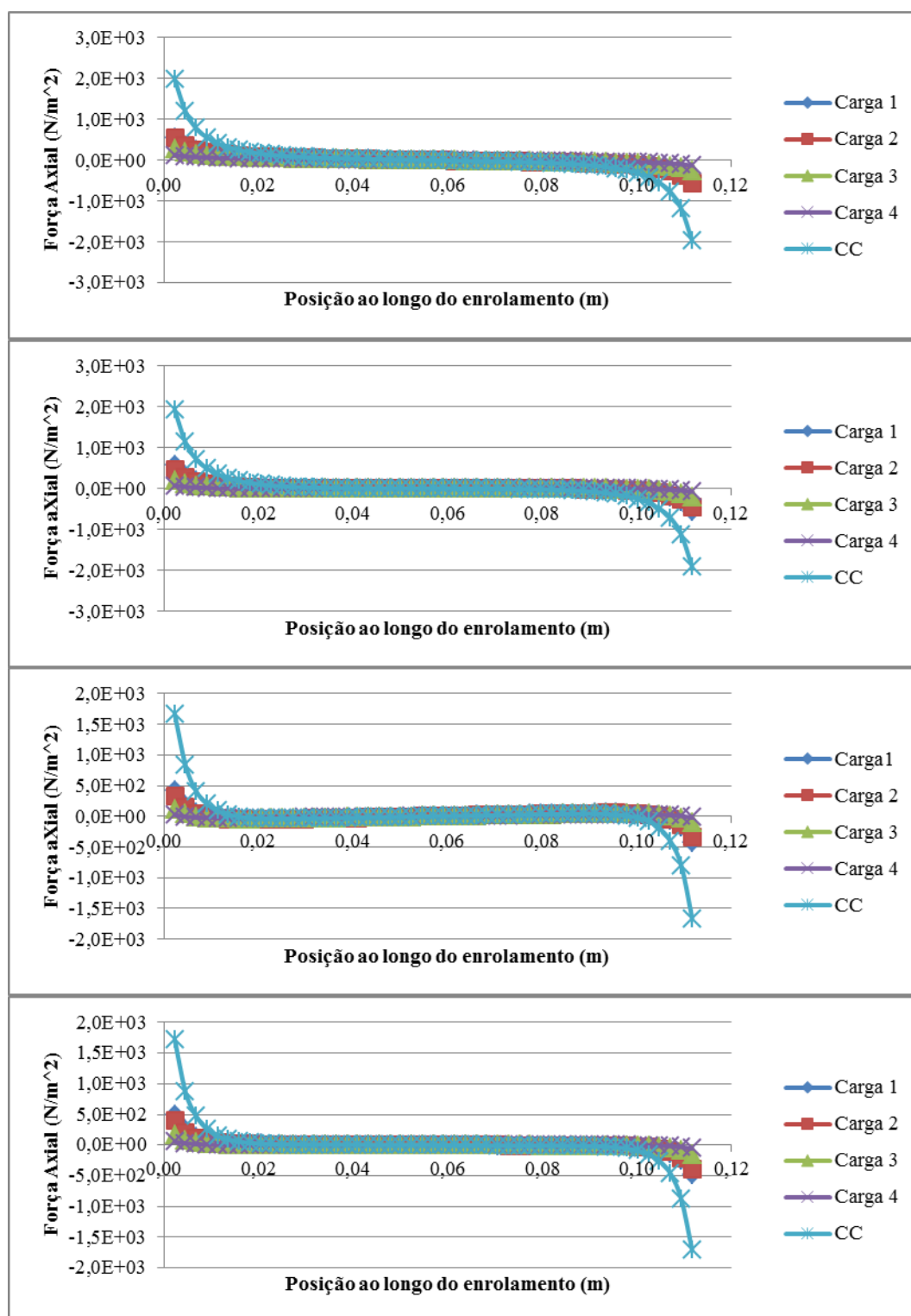


Figura 3.34: Forças Axiais nas regiões dos enrolamentos da segunda fase do transformador convencional. De cima para baixo, esquerda do primário, direita do primário, esquerda do secundário e direita do secundário.

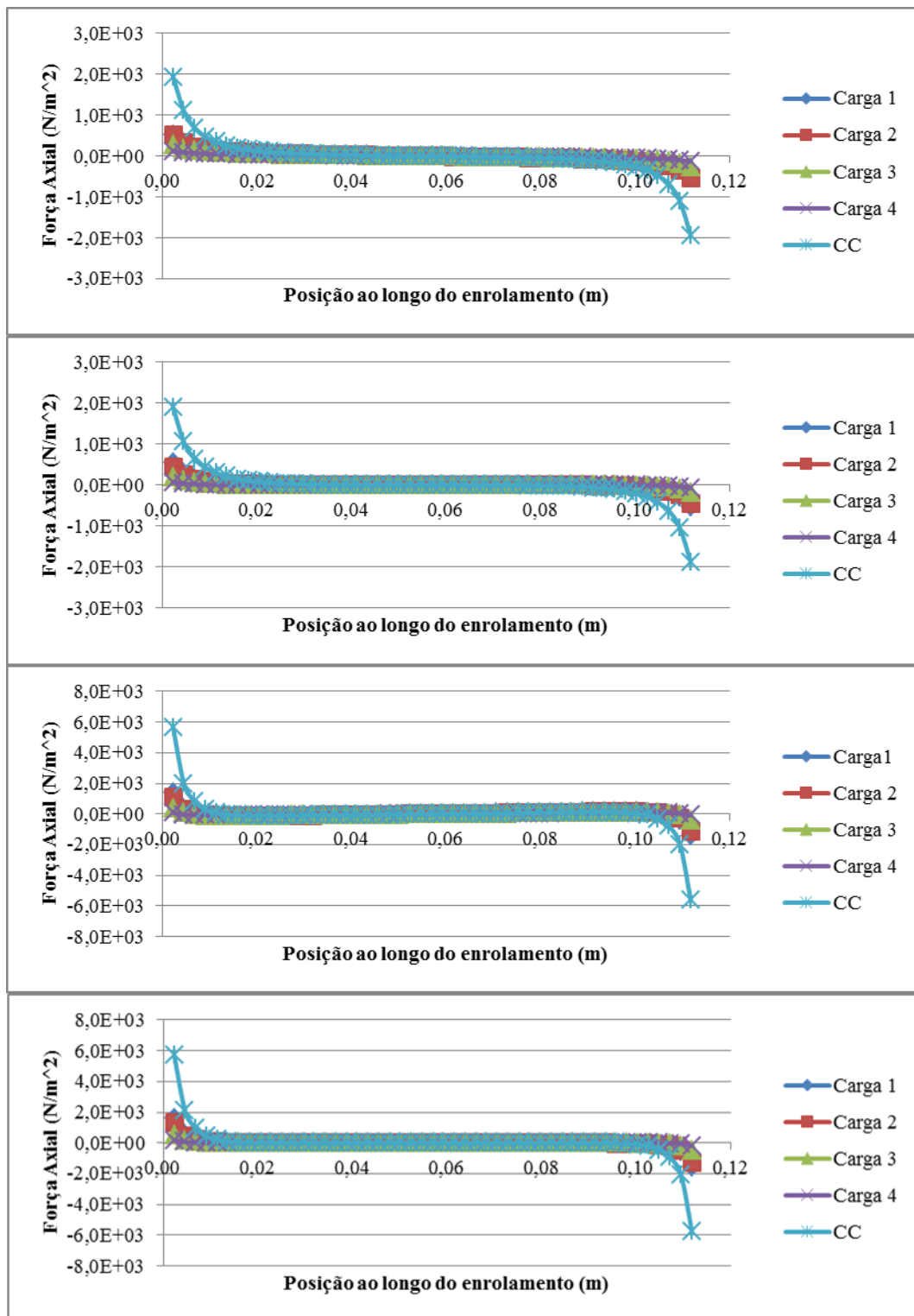


Figura 3.35: Forças Axiais nas regiões dos enrolamentos da segunda fase do transformador supercondutor. De cima para baixo, esquerda do primário, direita do primário, esquerda do secundário e direita do secundário.

Os esforços axiais existentes nas bobinas da terceira fase dos transformadores são representados em Figura 3.36 e na Figura 3.37. Conclui-se destes gráficos que as forças axiais nas bobinas desta fase têm, comportamento e valores de intensidade idênticos aos das forças existentes nos enrolamentos da segunda fase.

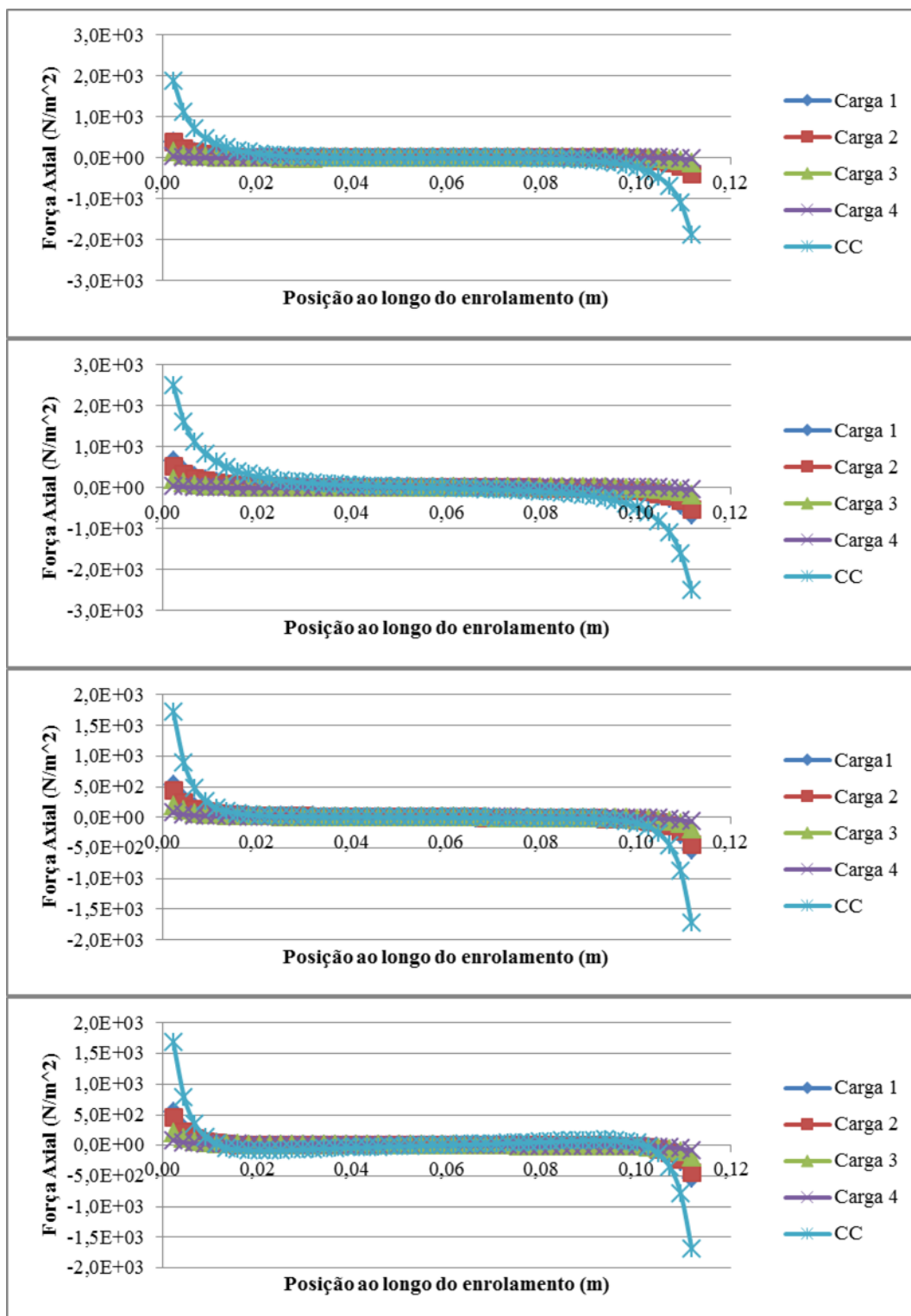


Figura 3.36: Forças Axiais nas regiões dos enrolamentos da terceira fase do transformador convencional. De cima para baixo, esquerda do primário, direita do primário, esquerda do secundário e direita do secundário.

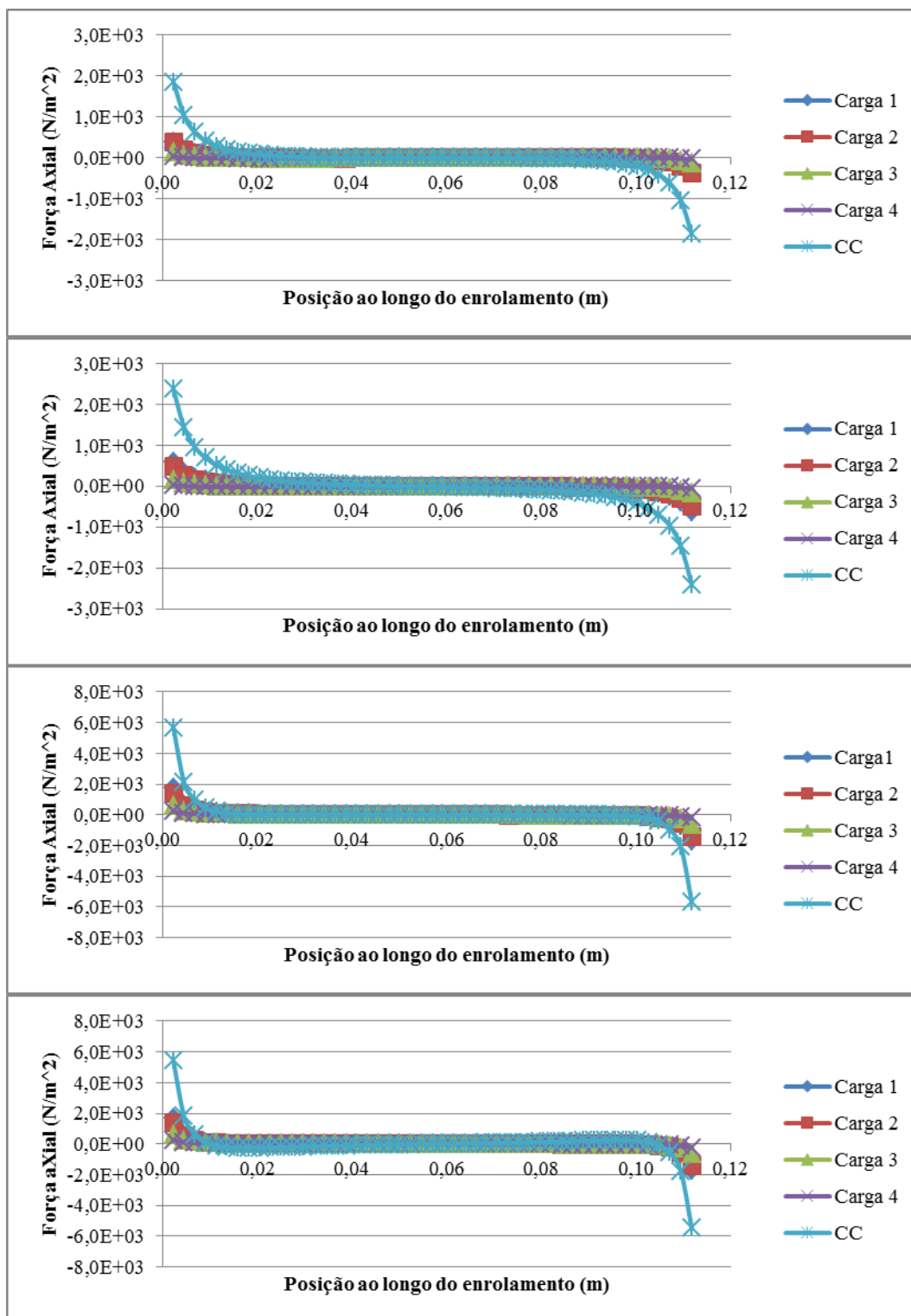


Figura 3.37: Forças Axiais nas regiões dos enrolamentos da terceira fase do transformador supercondutor. De cima para baixo, esquerda do primário, direita do primário, esquerda do secundário e direita do secundário.

Conclui-se que nos transformadores analisados os esforços axiais são de sentidos contrários nas extremidades dos enrolamentos com intensidades que em módulo são superiores. Também que da acumulação de força local para o centro da altura dos enrolamentos gera-se uma força compressiva nesse ponto.

Transformador trifásico convencional e supercondutor com derivação

São agora representados em Figura 3.38-3.49, as curvas das forças radiais e axiais exibidas nos enrolamentos dos transformadores, em presença de uma derivação de 10 mm de comprimento no secundário da segunda fase.

Na primeira fase dos transformadores para a situação de plena carga (PC) ou carga nominal, ilustrada na Figura 3.38, observa-se que os esforços nas regiões dos enrolamentos, externas à janela do transformador, são inferiores aos existentes nas regiões internas. As forças nos enrolamentos primários dos dispositivos apresentam características idênticas, sendo os seus esforços radiais de tracção. As intensidades à esquerda são pequenas relativamente às da direita, e nesta última região pode-se observar maiores valores no extremo superior do enrolamento. Nos enrolamentos secundários são visíveis as diferenças nas forças radiais, no TSC estes esforços assumem valores superiores.

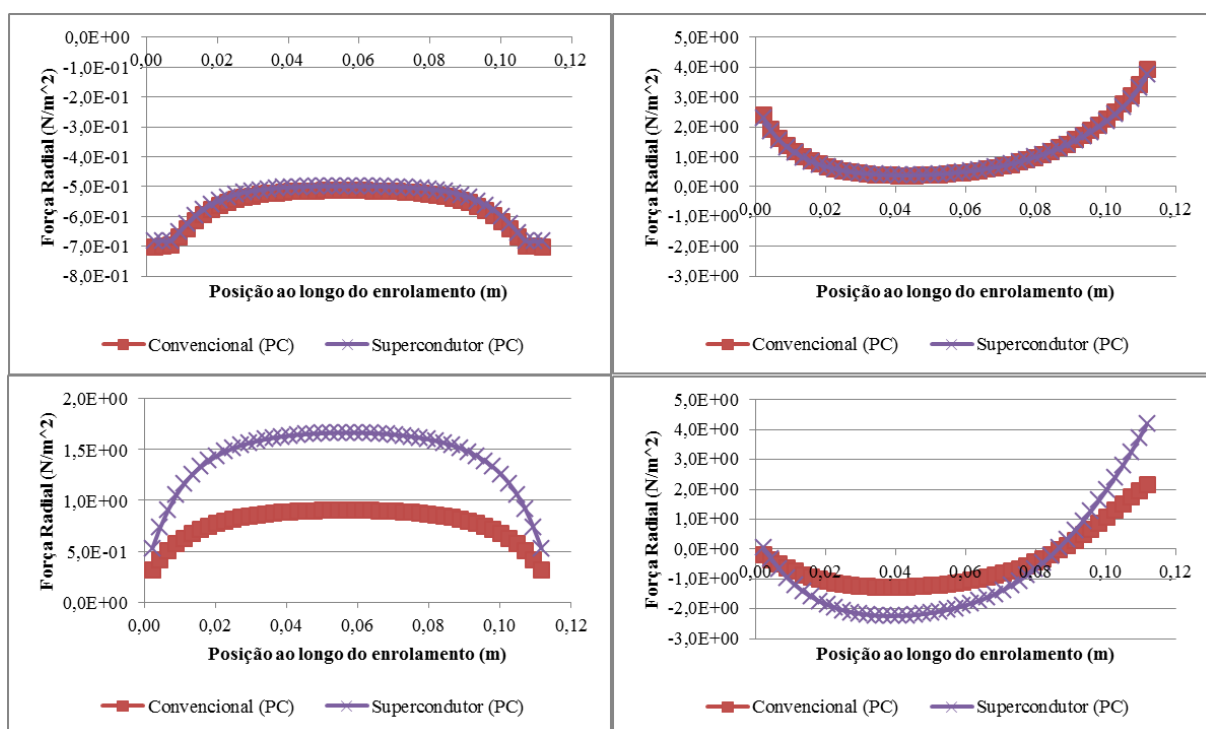


Figura 3.38: Forças radiais na primeira fase do transformador convencional e do supercondutor, em situação de plena carga. De cima para baixo, esquerda e direita do enrolamento primário, esquerda e direita do secundário.

Perante a existência de um curto-circuito, verifica-se da Figura 3.39, as forças radiais assumem para nas diferentes regiões características de compressão e/ou de tracção, consoante a localização seja interna ou externa à janela dos transformadores. Também pode-se visualizar que geralmente os esforços são mais intensos no transformador supercondutor do que no convencional.

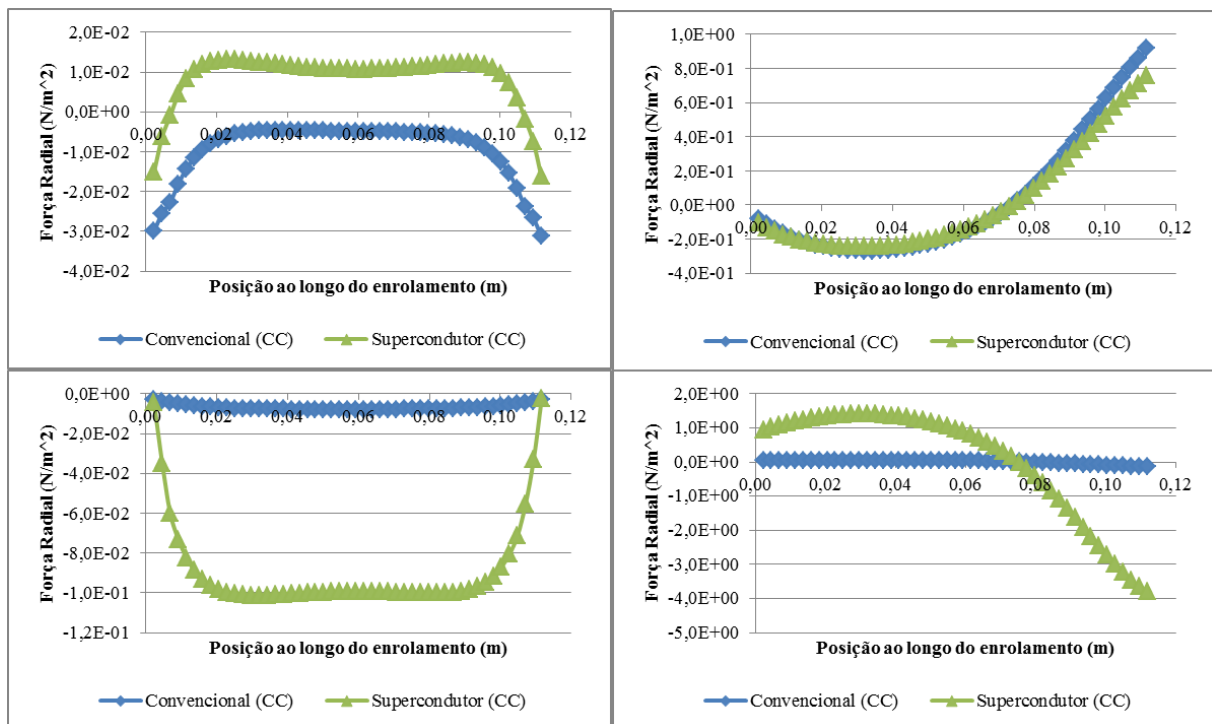


Figura 3.39: Forças radiais na primeira fase do transformador convencional e do supercondutor, em situação de curto-circuito. De cima para baixo, esquerda e direita do enrolamento primário, esquerda e direita do secundário.

Na segunda fase dos dois transformadores para as situações de plena carga e curto-circuito, representadas em Figura 3.40 e Figura 3.41 respectivamente, se observa que as forças radiais nos primários são compressivas com menor intensidade nos extremos superiores dos enrolamentos, redução que deve-se à derivação existente no secundário que conseqüentemente gera a diminuição do campo de indução axial responsável pela origem destas forças. Também verifica-se o aumento numa ordem de grandeza da intensidade destes esforços na situação de curto-circuito.

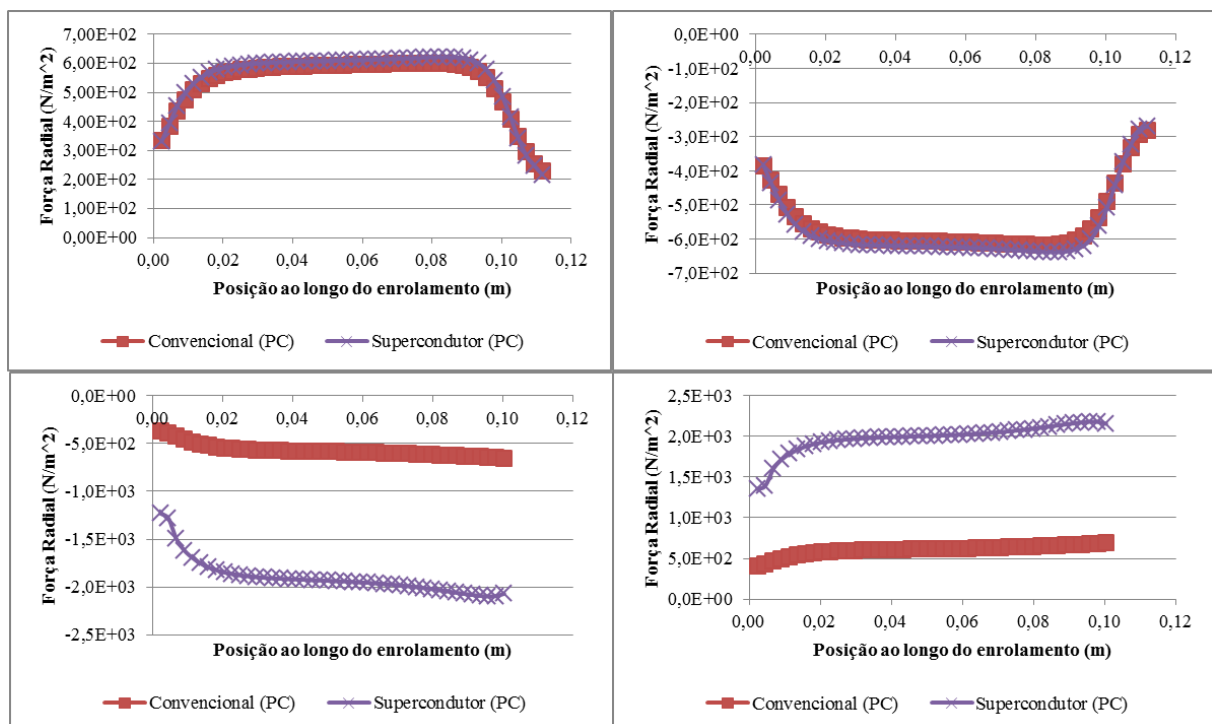


Figura 3.40: Forças radiais na segunda fase do transformador convencional e do supercondutor, em situação de plena carga. De cima para baixo, esquerda e direita do enrolamento primário, esquerda e direita do secundário.

Nas bobinas secundárias exibem-se forças radiais com efeitos de tracção, cujo valor aumenta consoante a aproximação ao extremo superior do enrolamento. Isto deve-se a que às forças no extremo da bobina modificada, geradas pelo campo de indução magnético de dispersão que a atravessa, vão sofrer ligeiros incrementos provocados pelo fluxo que afecta ao primário. Nas duas situações analisadas observa-se que os esforços no dispositivo supercondutor são múltiplas vezes maior que no convencional. Em presença de uma falha pode-se verificar o incremento das intensidades das forças numa ordem de grandeza.

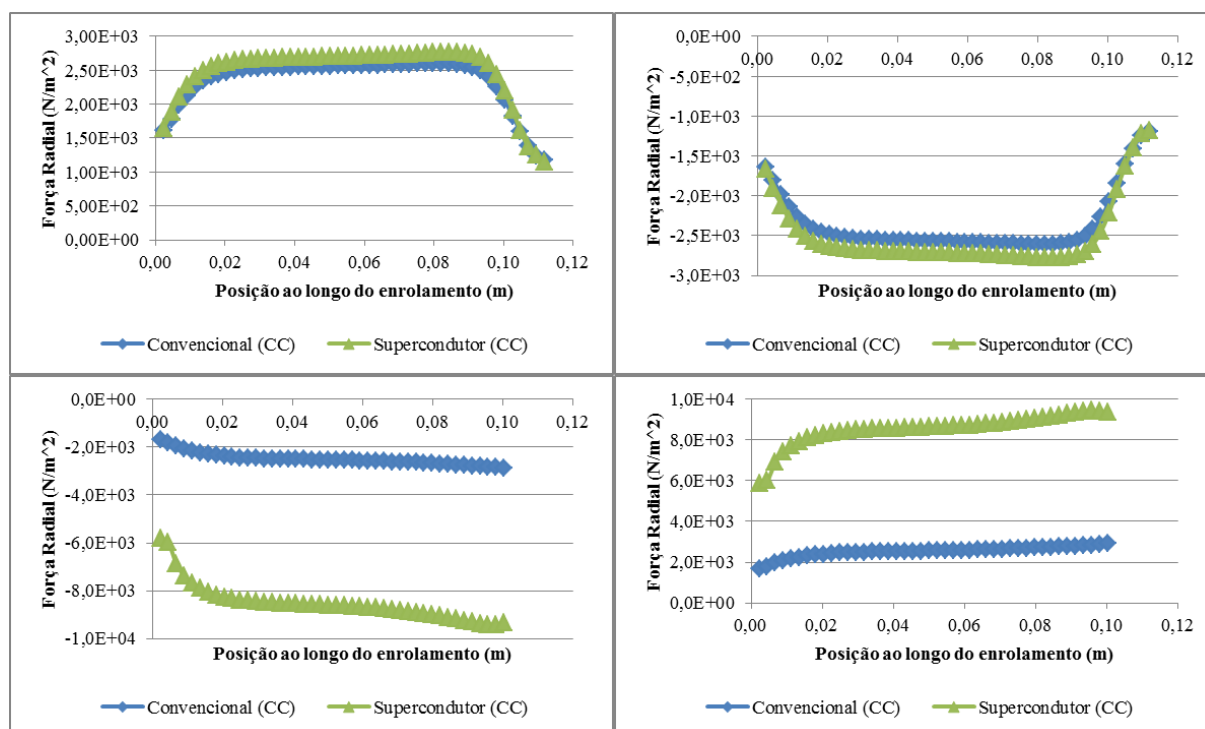


Figura 3.41: Forças radiais na segunda fase do transformador convencional e do supercondutor, em situação de curto-circuito. De cima para baixo, esquerda e direita do enrolamento primário, esquerda e direita do secundário.

As forças radiais ilustradas na Figura 3.42 e na Figura 3.43, são as referentes aos enrolamentos das terceiras fases dos transformadores. Observa-se que os comportamentos destes esforços são semelhantes aos encontrados nas bobinas das segundas fases. Diferenciam-se em que nesta fase os esforços estão melhor distribuídos ao longo dos enrolamentos, visto que nesta fase não existe derivação no secundário.

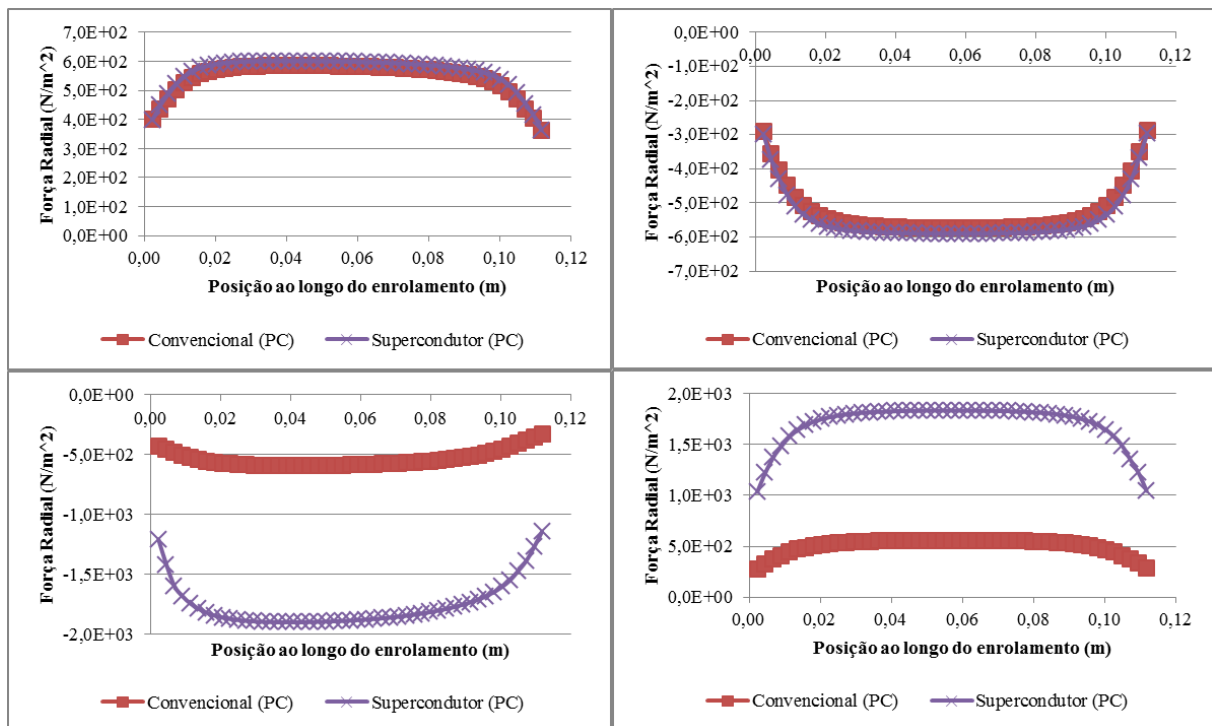


Figura 3.42: Forças radiais na terceira fase do transformador convencional e do supercondutor, em situação de plena carga. De cima para baixo, esquerda e direita do enrolamento primário, esquerda e direita do secundário.

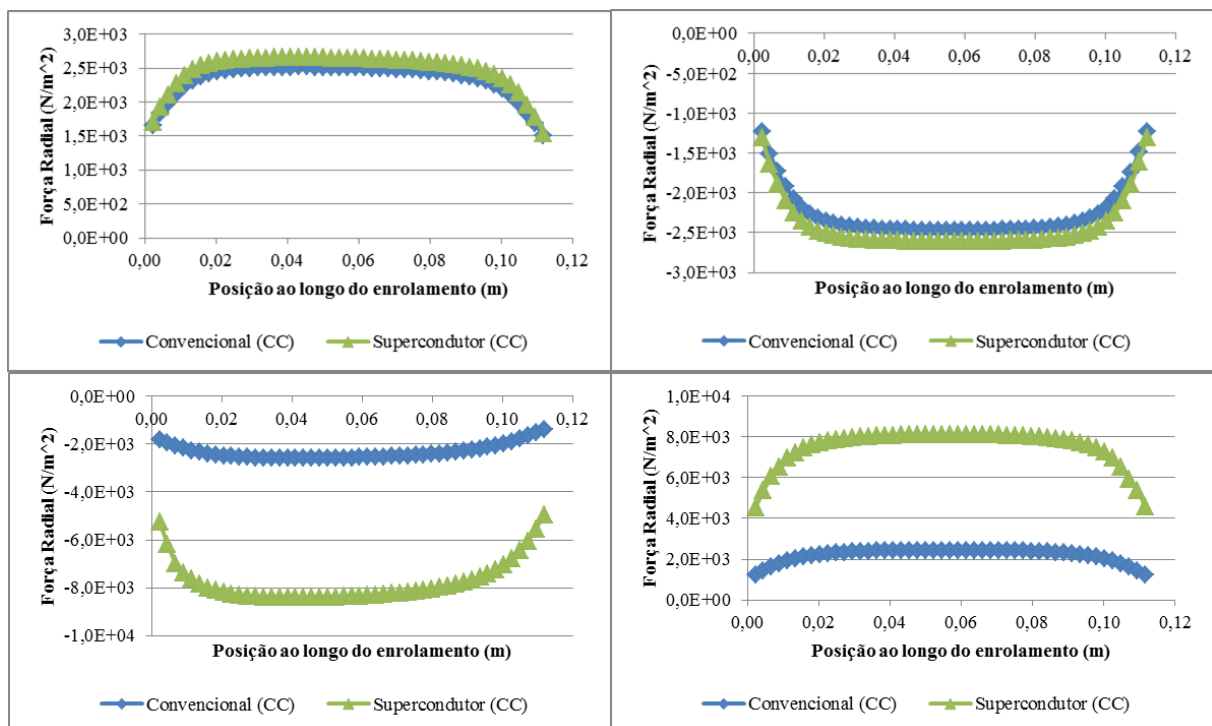


Figura 3.43: Forças radiais na terceira fase do transformador convencional e do supercondutor, em situação de curto-circuito. De cima para baixo, esquerda e direita do enrolamento primário, esquerda e direita do secundário.

Nas Figuras 3.44-3.45 encontram-se representadas as forças axiais nos enrolamentos da primeira fase dos transformadores em plena carga e curto-circuito, respectivamente. Sobre as regiões externas ao núcleo pode-se concluir que os esforços apresentam curvas semelhantes às que se obtém num transformador sem modificações, ou seja, máximos consoante à aproximação aos extremos dos enrolamentos. Também que as diferenças nos esforços do transformador convencional relativamente ao supercondutor aumentam sob presença de uma falha.

As zonas localizadas no interior da janela do transformador apresentam forças axiais com comportamentos pouco usuais, pois em plena carga os esforços variam levemente mas aproximadamente a partir dos $\frac{3}{4}$ de enrolamento observa-se decrescimento dos esforços num sentido e crescimento no sentido contrário. Esta situação intensifica-se perante uma falha, em que os esforços sofrem mudança de intensidade e sentido mais rapidamente.

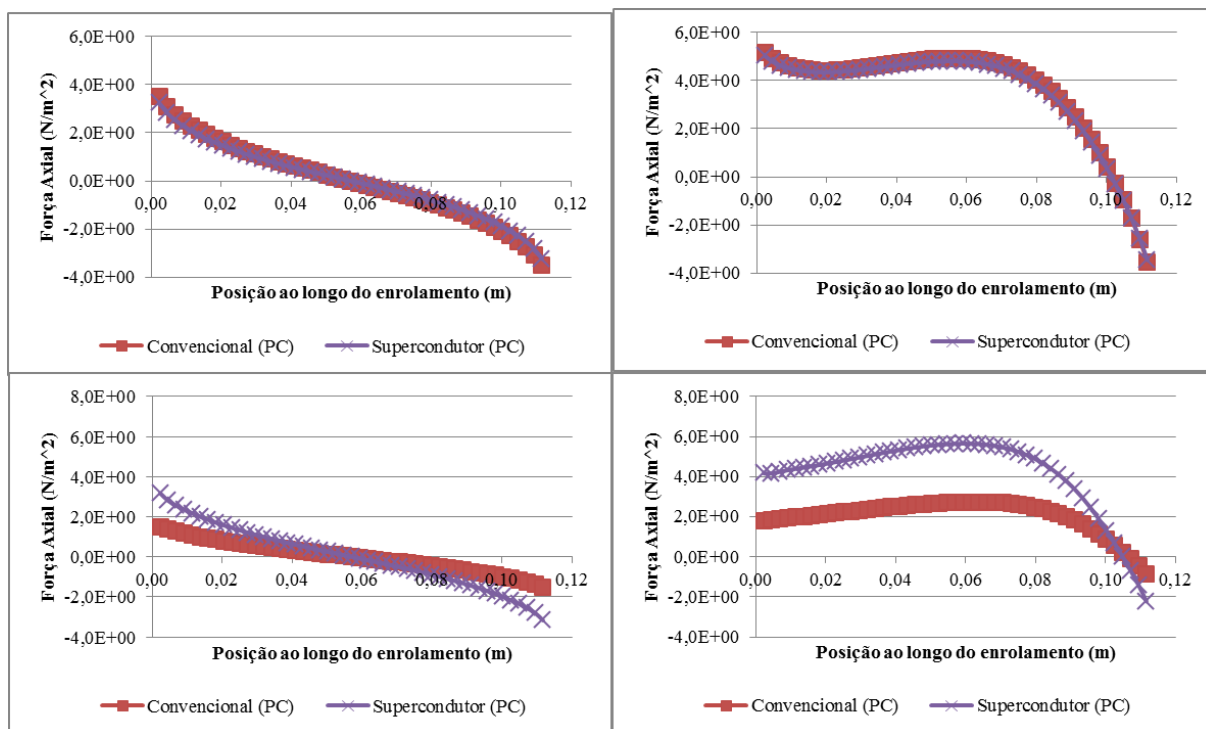


Figura 3.44: Forças axiais na primeira fase do transformador convencional e do supercondutor, em situação de plena carga. De cima para baixo, esquerda e direita do enrolamento primário, esquerda e direita do secundário.

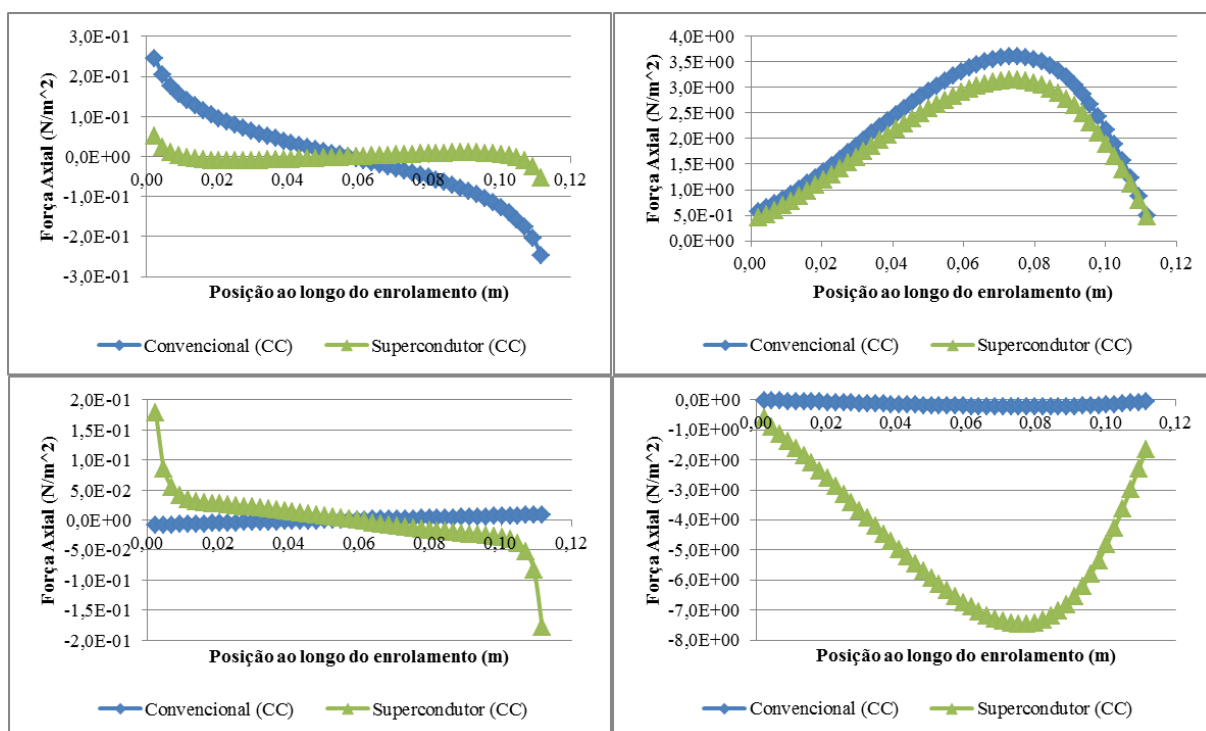


Figura 3.45: Forças axiais na primeira fase do transformador convencional e do supercondutor, em situação de curto-circuito. De cima para baixo, esquerda e direita do enrolamento primário, esquerda e direita do secundário.

É importante realçar das situações acima expostas, que em curto-circuito o primário do transformador convencional tem maiores intensidades, mas no secundário é o enrolamento do transformador supercondutor o que mostra valores superiores.

São expostos em Figura 3.46 e Figura 3.47 os gráficos das forças axiais nos enrolamentos da segunda fase dos dispositivos simulados. Observa-se que os esforços aumentam nos extremos dos enrolamentos, tal como esperado, mas no primário existe um aumento dos esforços na zona onde é realizada a derivação no secundário. Este fenómeno deve-se ao aumento do fluxo magnético radial como consequência da decomposição do campo de indução magnético de dispersão responsável pela origem das forças axiais no extremo do enrolamento secundário.

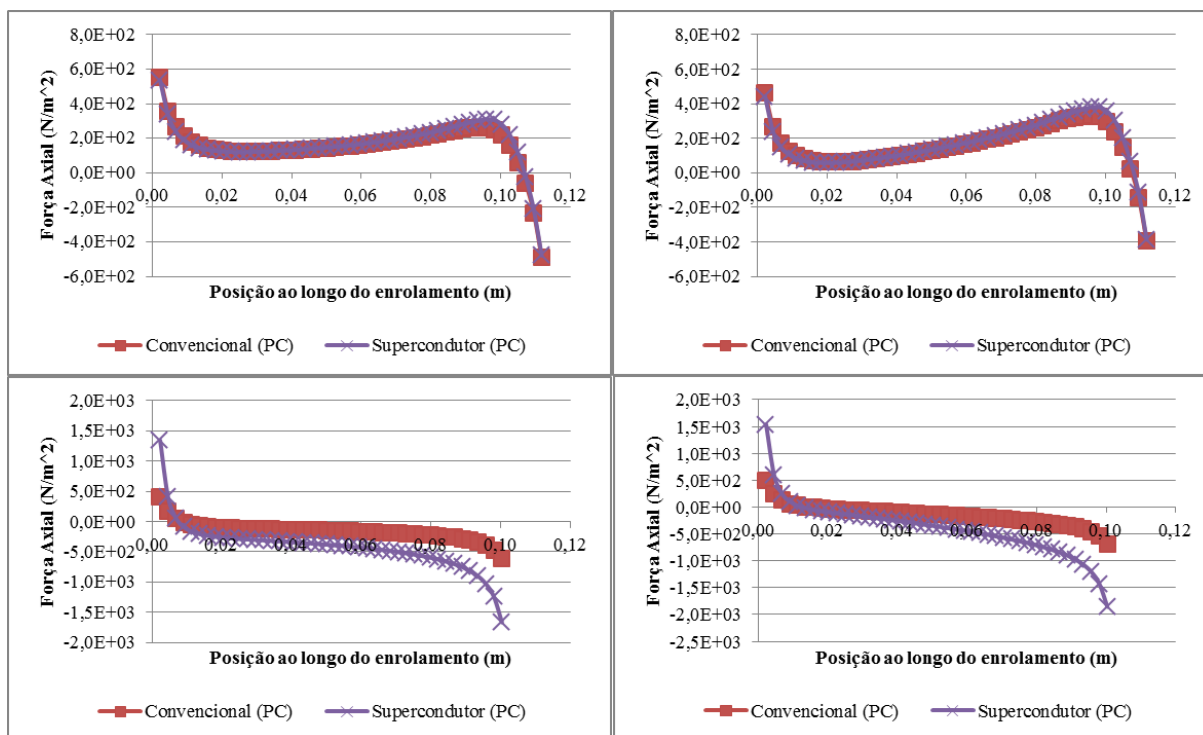


Figura 3.46: Forças axiais na segunda fase do transformador convencional e do supercondutor, em situação de plena carga. De cima para baixo, esquerda e direita do enrolamento primário, esquerda e direita do secundário.

Na situação de curto-circuito observa-se que o comportamento das forças axiais é semelhante, existindo variação na gama de valores que atingem.

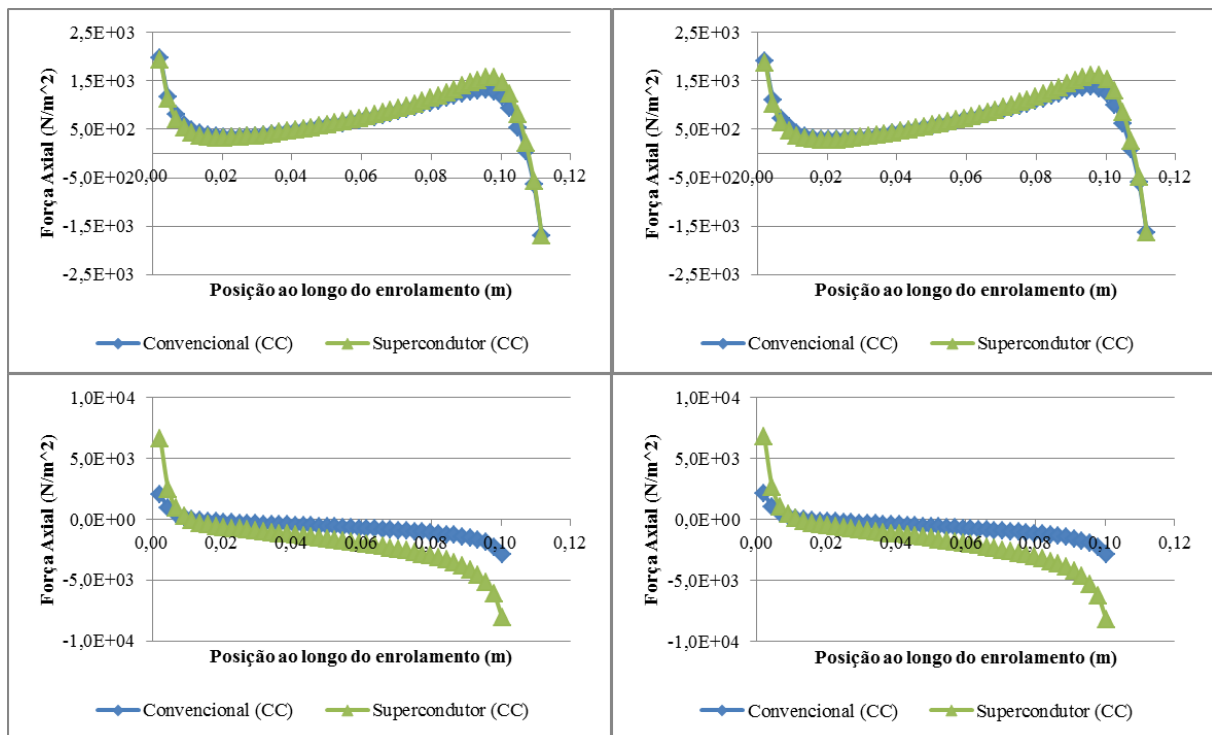


Figura 3.47: Forças axiais na segunda fase do transformador convencional e do supercondutor, em situação de curto-circuito. De cima para baixo, esquerda e direita do enrolamento primário, esquerda e direita do secundário.

As Figura 3.48 e Figura 3.49 ilustram os esforços axiais nas bobinas da terceira fase dos protótipos de transformadores em análise. Nestes enrolamentos é observado que as forças axiais apresentam as intensidades mais elevadas nas extremidades, como é suposto. Também é identificável a ligeira influência nas proximidades dos extremos superiores dos enrolamentos, dos efeitos que advêm da derivação existente no secundário da segunda fase. Quando comparados os esforços em plena carga com os resultantes em presença de falha, verifica-se um incremento nos valores que é de aproximadamente uma ordem de grandeza.

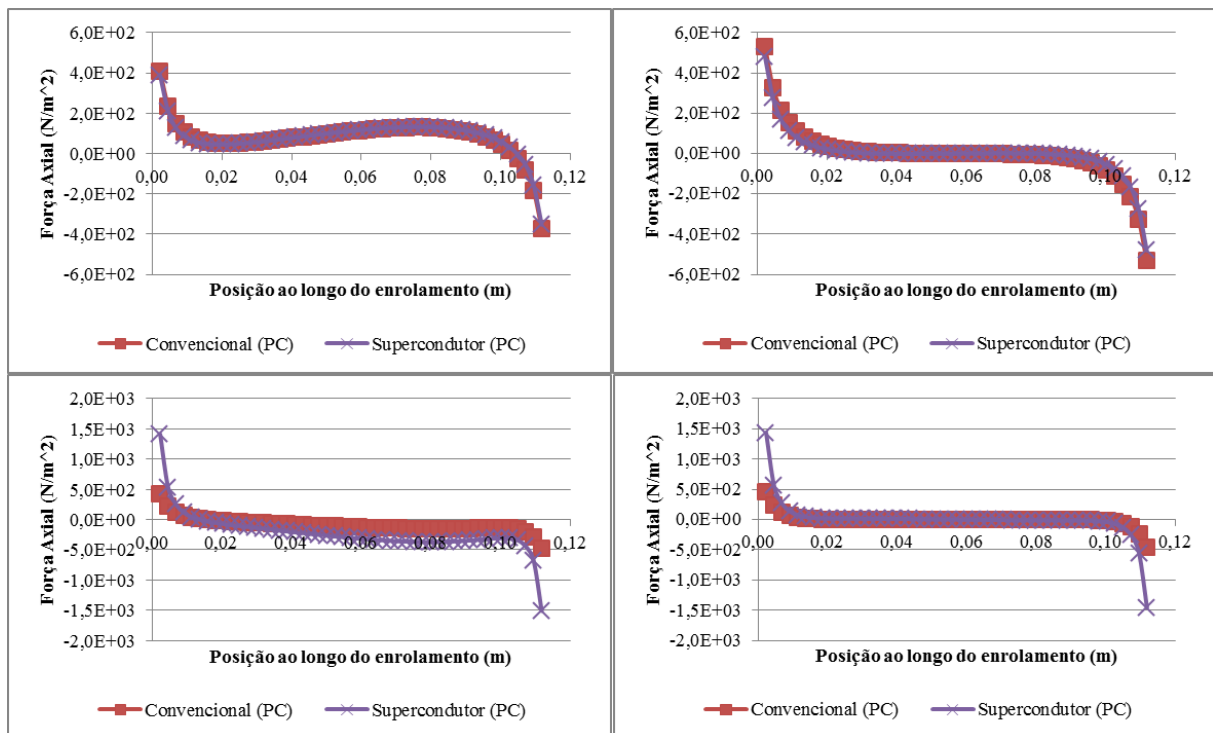


Figura 3.48: Forças axiais na terceira fase do transformador convencional e do supercondutor, em situação de plena carga. De cima para baixo, esquerda e direita do enrolamento primário, esquerda e direita do secundário.

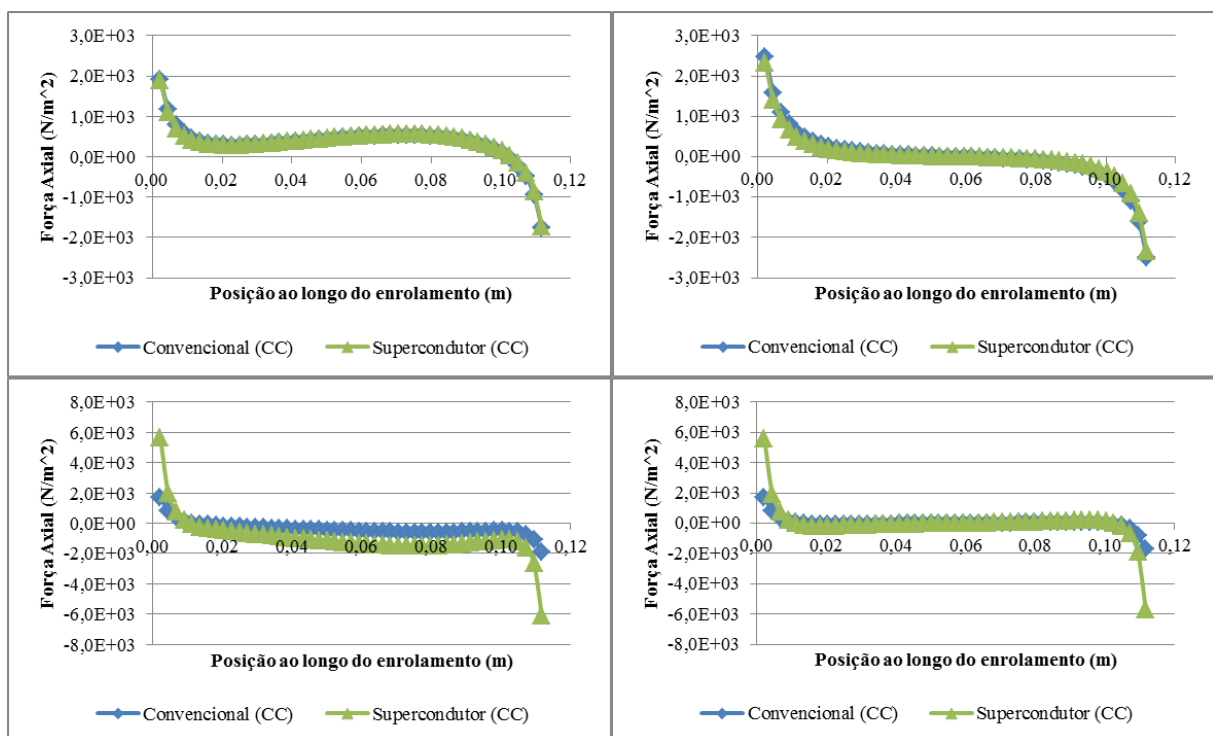


Figura 3.49: Forças axiais na terceira fase do transformador convencional e do supercondutor, em situação de curto-circuito. De cima para baixo, esquerda e direita do enrolamento primário, esquerda e direita do secundário.

Transformador trifásico convencional e supercondutor com deslocação axial dos enrolamentos secundários.

Nas figuras, Figura 3.50-3.61, encontram-se os gráficos das curvas das forças radiais e axiais exibidos nos enrolamentos dos transformadores, em presença de uma deslocação axial de 5 mm em todos os enrolamentos secundários.

As forças radiais nos enrolamentos da primeira fase, ilustradas em Figura 3.50 e Figura 3.51, mostram que perante esta irregularidade na região externa ao núcleo o comportamento dos esforços é semelhante ao encontrado no transformador original. Enquanto na zona direita dos enrolamentos existe desequilíbrio na distribuição dos esforços ao longo dos enrolamentos, com maior intensidade no extremo superior das bobinas. Visualiza-se que perante um curto-circuito os esforços sofrem uma redução de aproximadamente uma ordem de grandeza quando comparado com o funcionamento em plena carga, situação que diverge dos resultados esperados, isto é, o aumento dos esforços em presença de falha.

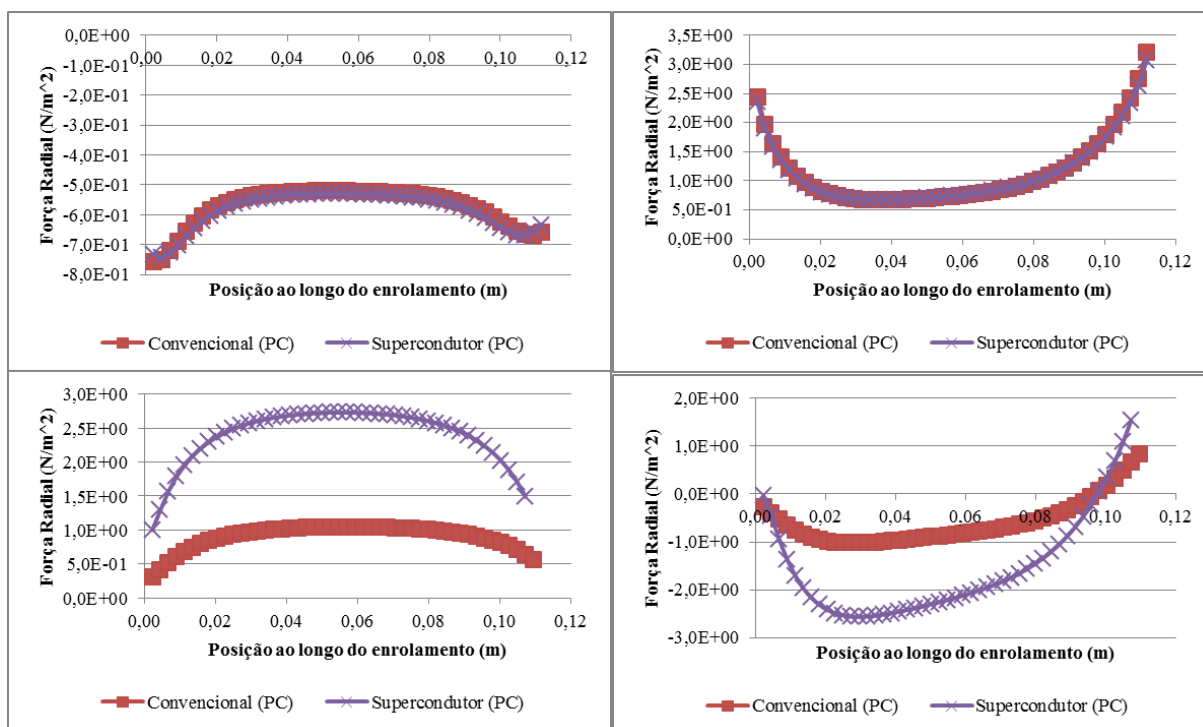


Figura 3.50: Forças radiais na primeira fase do transformador convencional e do supercondutor, em situação de plena carga. De cima para baixo, esquerda e direita do enrolamento primário, esquerda e direita do secundário.

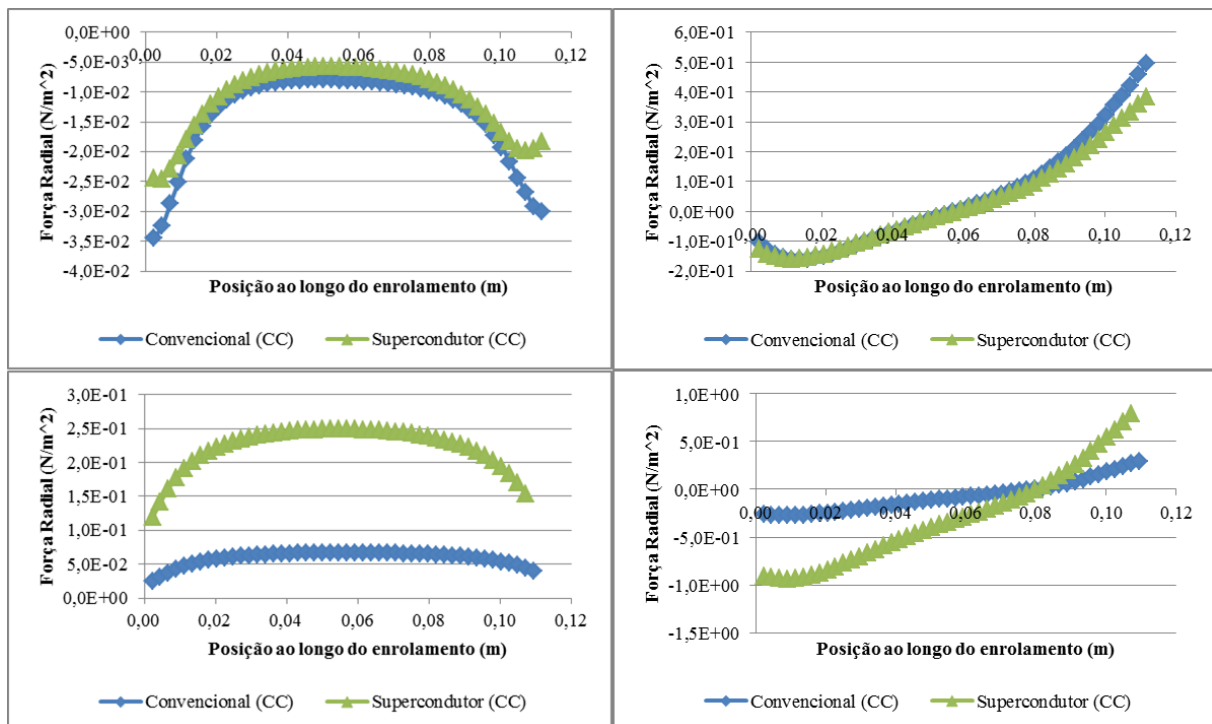


Figura 3.51: Forças radiais na primeira fase do transformador convencional e do supercondutor, em situação de curto-circuito. De cima para baixo, esquerda e direita do enrolamento primário, esquerda e direita do secundário.

Analisando as Figura 3.52, Figura 3.53, Figura 3.54 e Figura 3.55, se observa os esforços radiais nos enrolamentos das fases localizadas mais à direita no transformador, apresentam curvas semelhantes. Nas bobinas dos primários, existe uma redução dos valores das forças na extremidade superior, isto se deve que nessa zona diminui a influência das forças geradas no secundário. O mesmo efeito ocorre na extremidade inferior dos enrolamentos secundários, observando-se uma diminuição das intensidades das forças radiais. Nos enrolamentos primários verifica-se que os efeitos das forças são de compressão e nos secundários são de tracção. Comparando os esforços em plena carga com os resultantes da simulação em curto-circuito, conclui-se que as forças radiais nestas duas fases sofrem um incremento de uma ordem de grandeza.

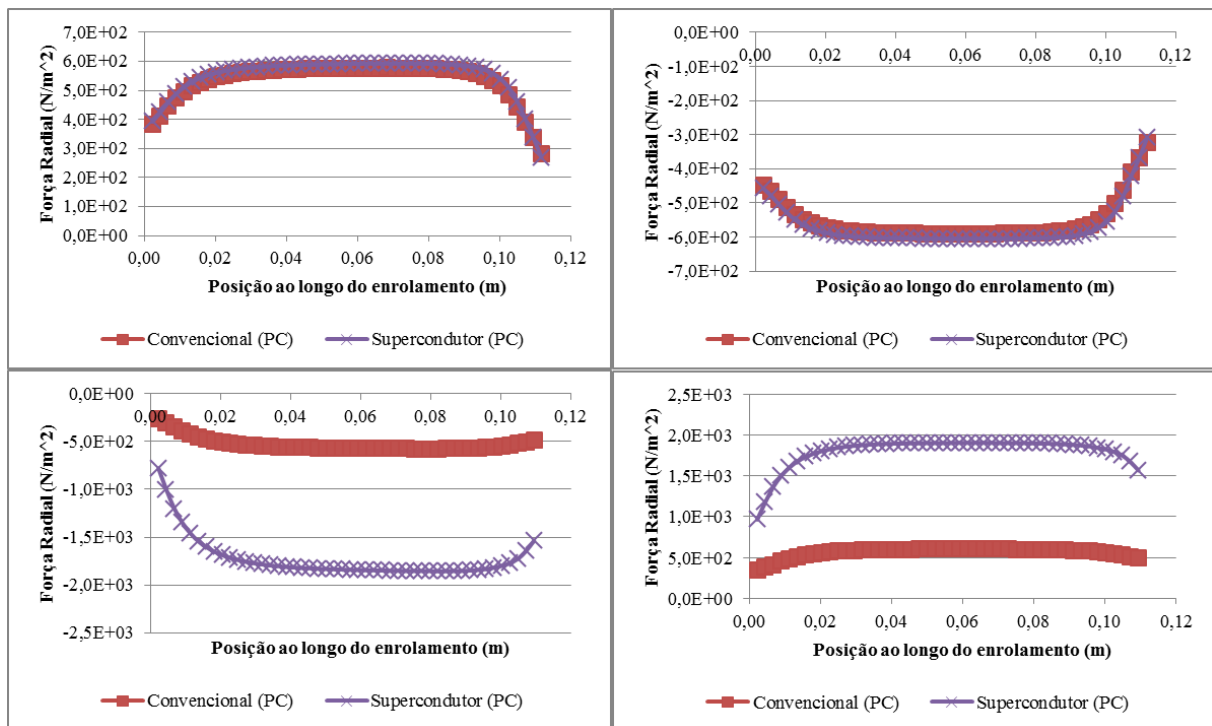


Figura 3.52: Forças radiais na segunda fase do transformador convencional e do supercondutor, em situação de plena carga. De cima para baixo, esquerda e direita do enrolamento primário, esquerda e direita do secundário.

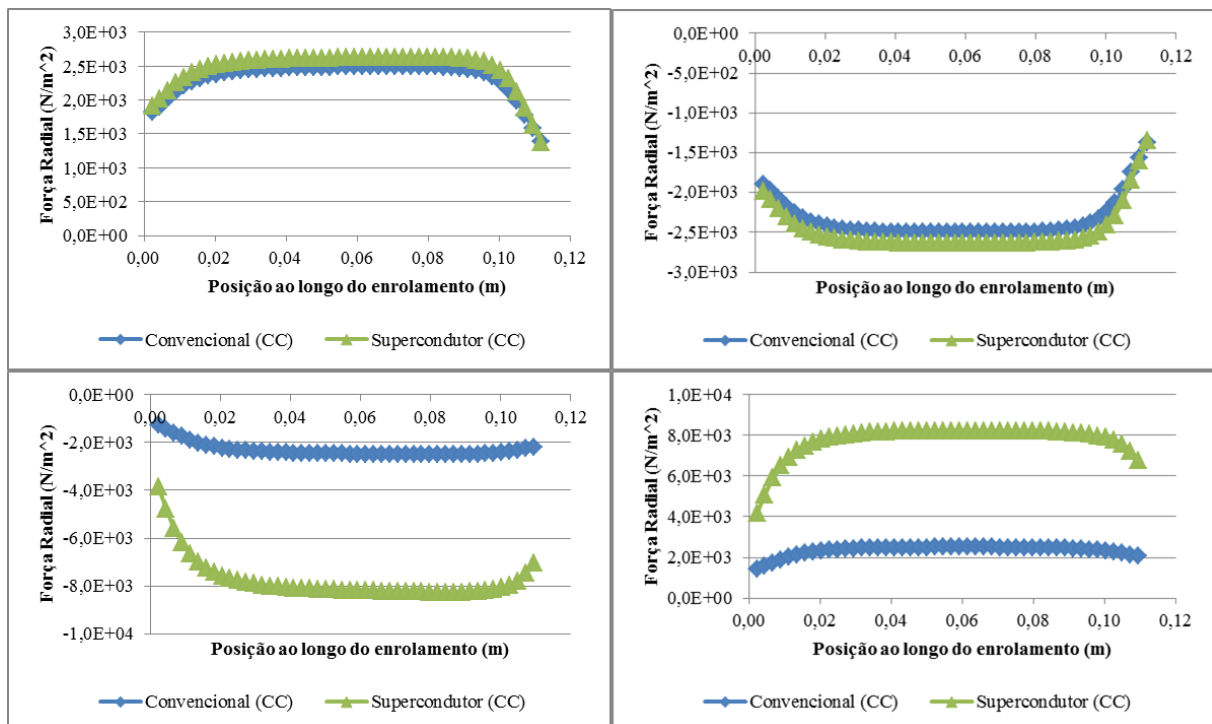


Figura 3.53: Forças radiais na segunda fase do transformador convencional e do supercondutor, em situação de curto-circuito. De cima para baixo, esquerda e direita do enrolamento primário, esquerda e direita do secundário.

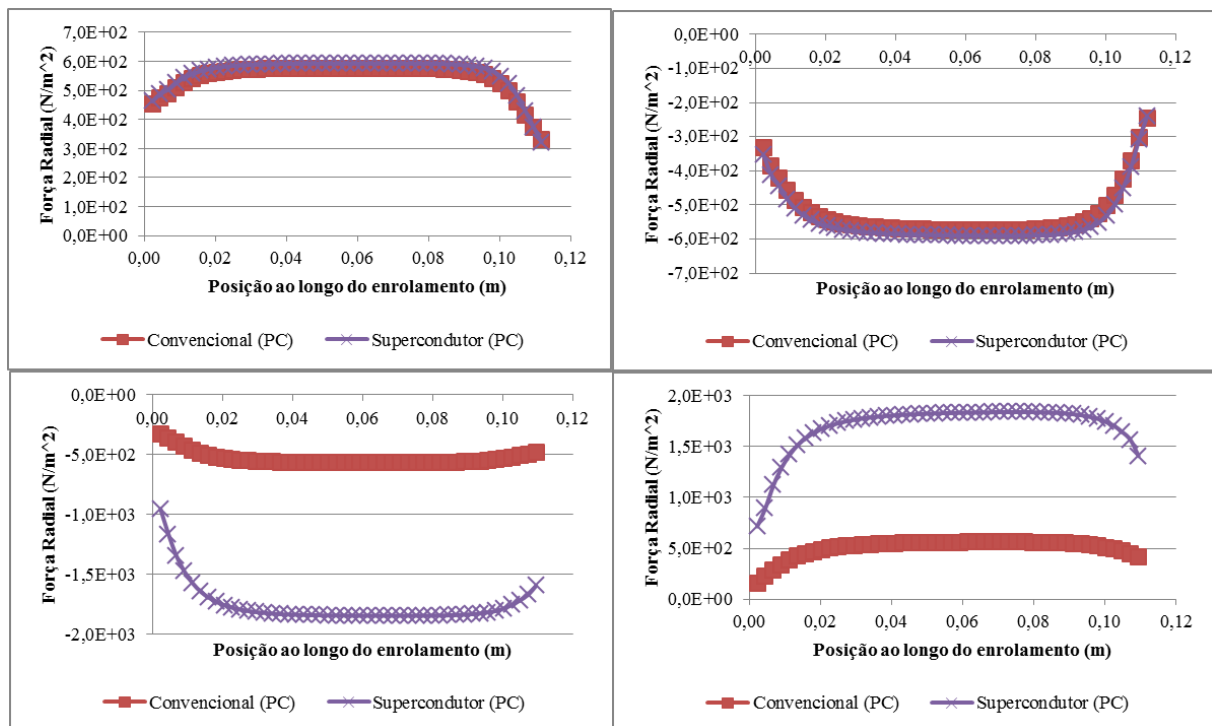


Figura 3.54: Forças radiais na terceira fase do transformador convencional e do supercondutor, em situação de plena carga. De cima para baixo, esquerda e direita do enrolamento primário, esquerda e direita do secundário.

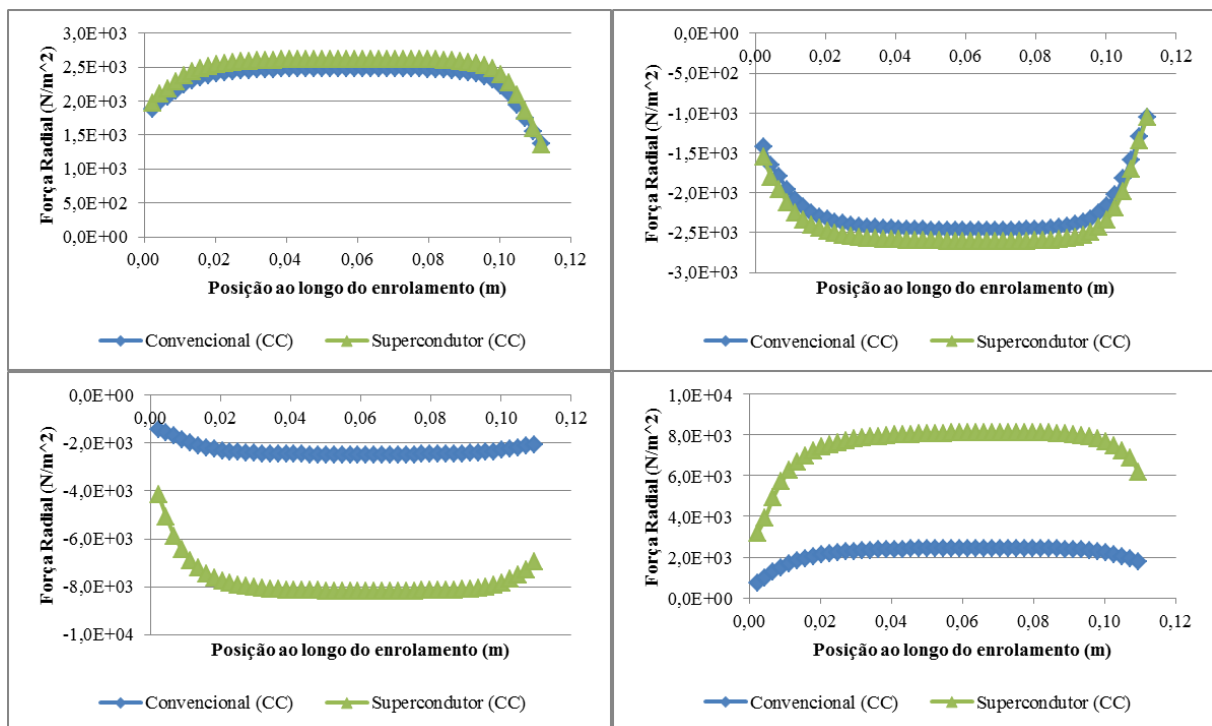


Figura 3.55: Forças radiais na terceira fase do transformador convencional e do supercondutor, em situação de curto-circuito. De cima para baixo, esquerda e direita do enrolamento primário, esquerda e direita do secundário.

Ilustra-se nas Figura 3.56 e Figura 3.57, que as forças axiais apresentam à esquerda dos enrolamentos, curvas mais parecidas com as existentes no transformador sem irregularidades. Observa-se que no interior da janela do transformador os esforços sofrem variações significativas. Quando comparados os esforços nos enrolamentos do transformador supercondutor com os do

convencional observa-se que o secundário toma valores de força maiores enquanto no primário as curvas de força são semelhantes.

Na situação de curto-circuito se visualiza que os esforços sofrem uma redução de intensidade em relação aos esforços existentes no funcionamento normal. Além, deixa de existir a distribuição de força esperada nas regiões internas à janela, ou seja, os valores máximos das forças passam a ser no centro da altura dos enrolamentos em lugar dos extremos.

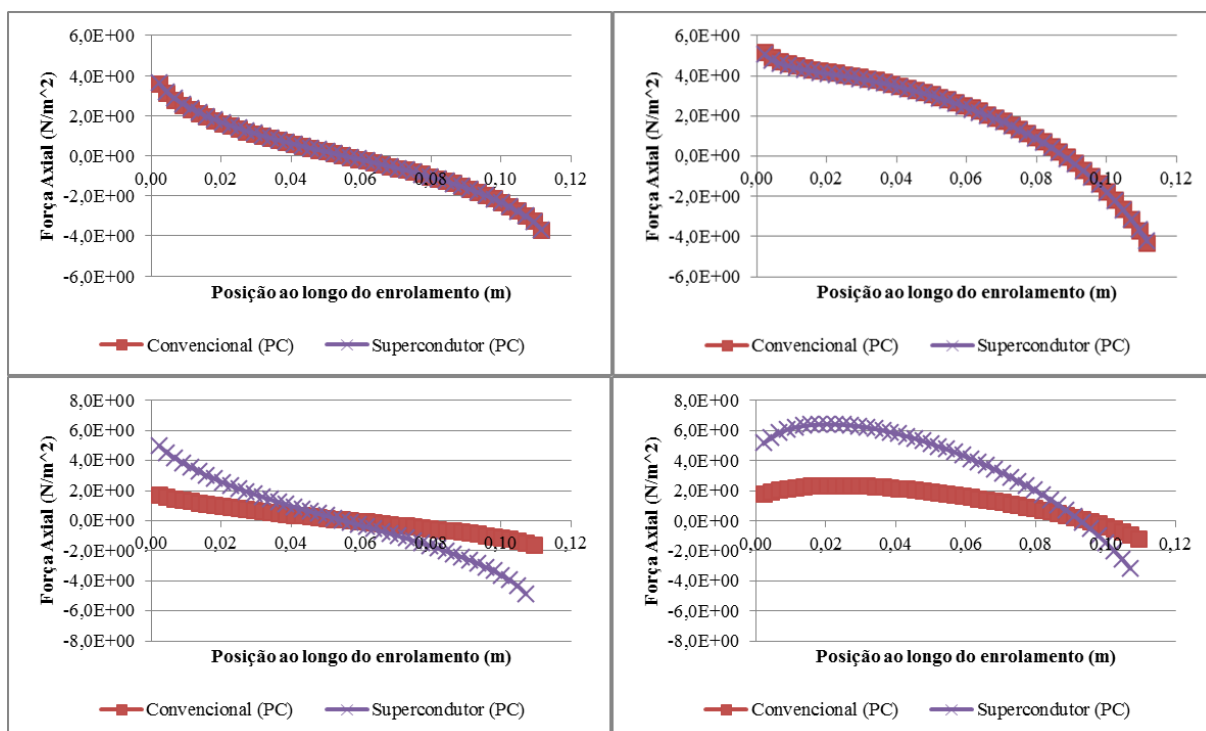


Figura 3.56: Forças axiais na primeira fase do transformador convencional e do supercondutor, em situação de plena carga. De cima para baixo, esquerda e direita do enrolamento primário, esquerda e direita do secundário.

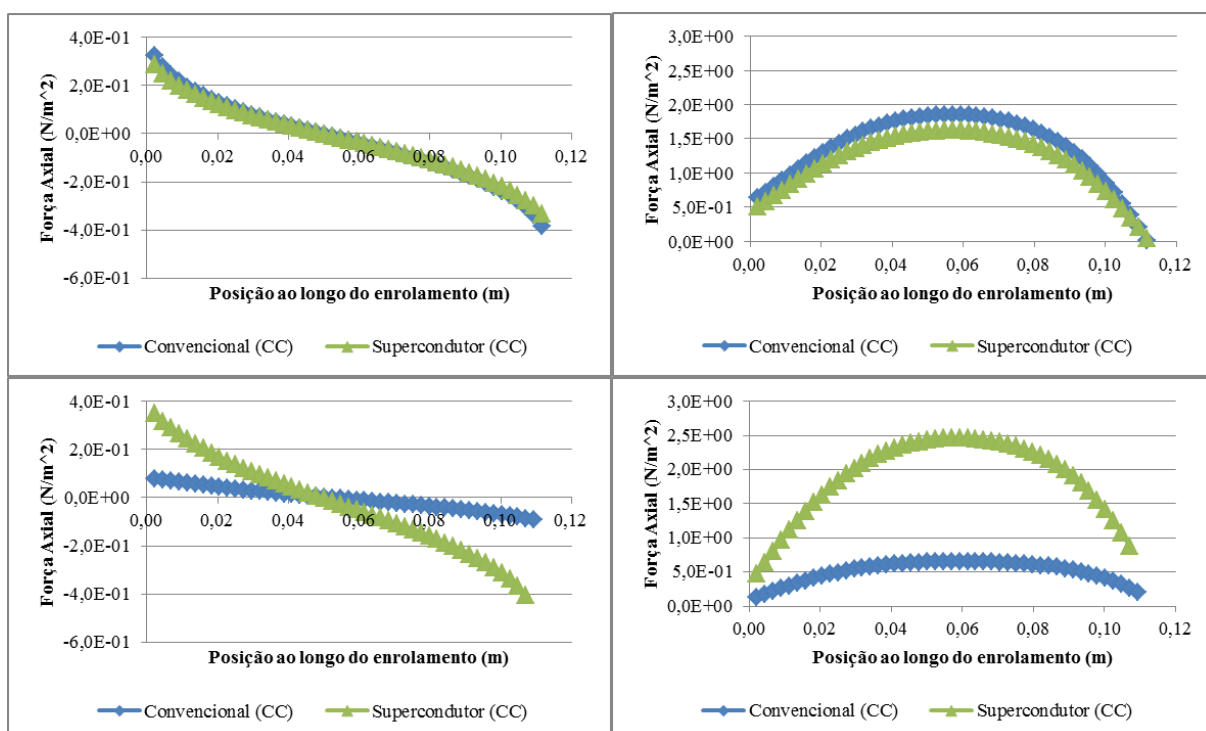


Figura 3.57: Forças axiais na primeira fase do transformador convencional e do supercondutor, em situação de curto-circuito. De cima para baixo, esquerda e direita do enrolamento primário, esquerda e direita do secundário.

Dos esforços representados em Figura 3.58, Figura 3.59, Figura 3.60 e Figura 3.61, conclui-se que na segunda e terceira fase as forças axiais têm comportamento e intensidades semelhantes. Em todos os esforços aumentam consoante a aproximação às extremidades, existindo alguma modificações nos pontos a partir dos quais o enrolamento primário passa a sentir os efeitos da decomposição das linhas de campo de indução no secundário e vice-versa. Nas duas fases pode-se visualizar também que existe um aumento dos esforços no secundário do transformador supercondutor em relação ao do transformador convencional. Ainda, do funcionamento em plena carga para a situação de curto-circuito se verifica um aumento dos esforços numa ordem de grandeza.

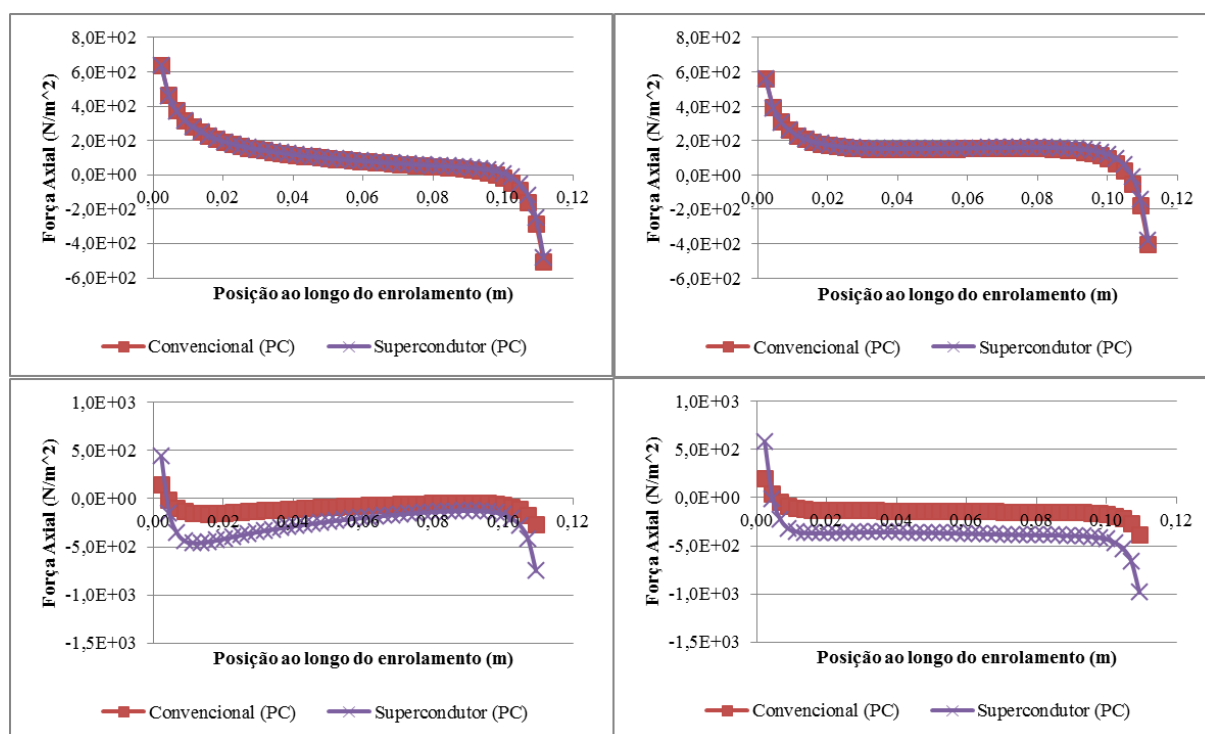


Figura 3.58: Forças axiais na segunda fase do transformador convencional e do supercondutor, em situação de plena carga. De cima para baixo, esquerda e direita do enrolamento primário, esquerda e direita do secundário.

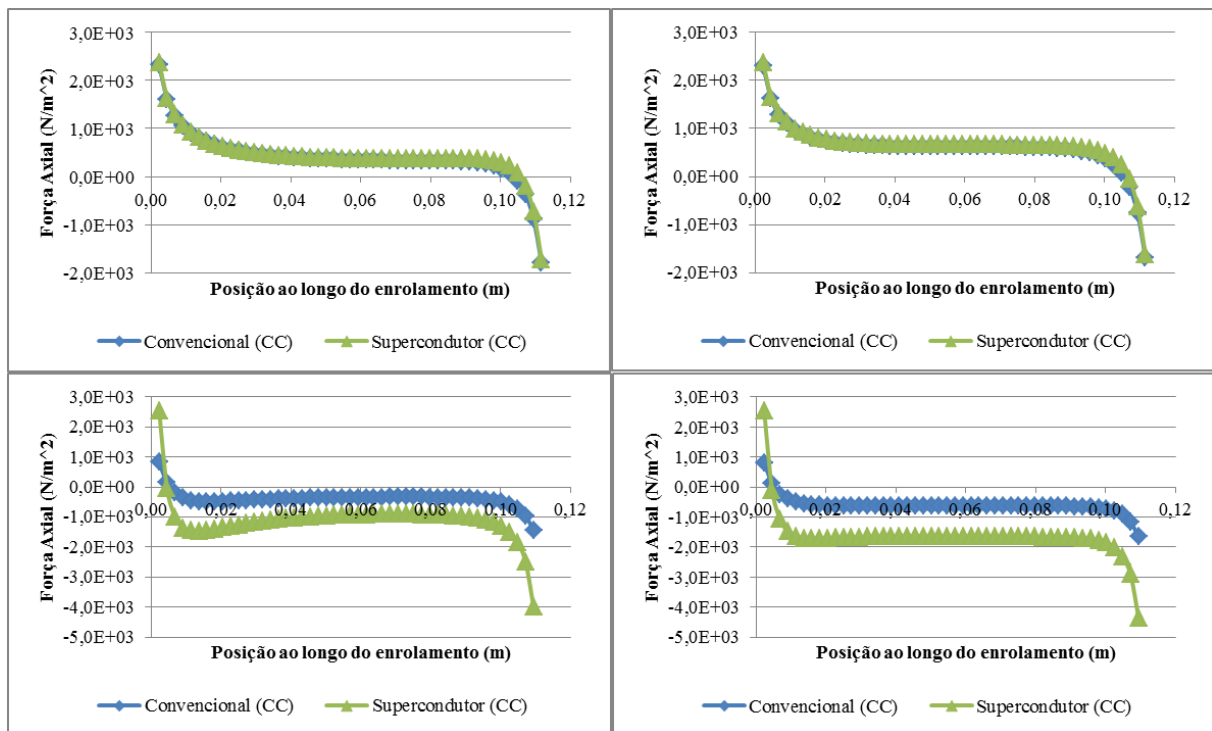


Figura 3.59: Forças axiais na segunda fase do transformador convencional e do supercondutor, em situação de curto-circuito. De cima para baixo, esquerda e direita do enrolamento primário, esquerda e direita do secundário.

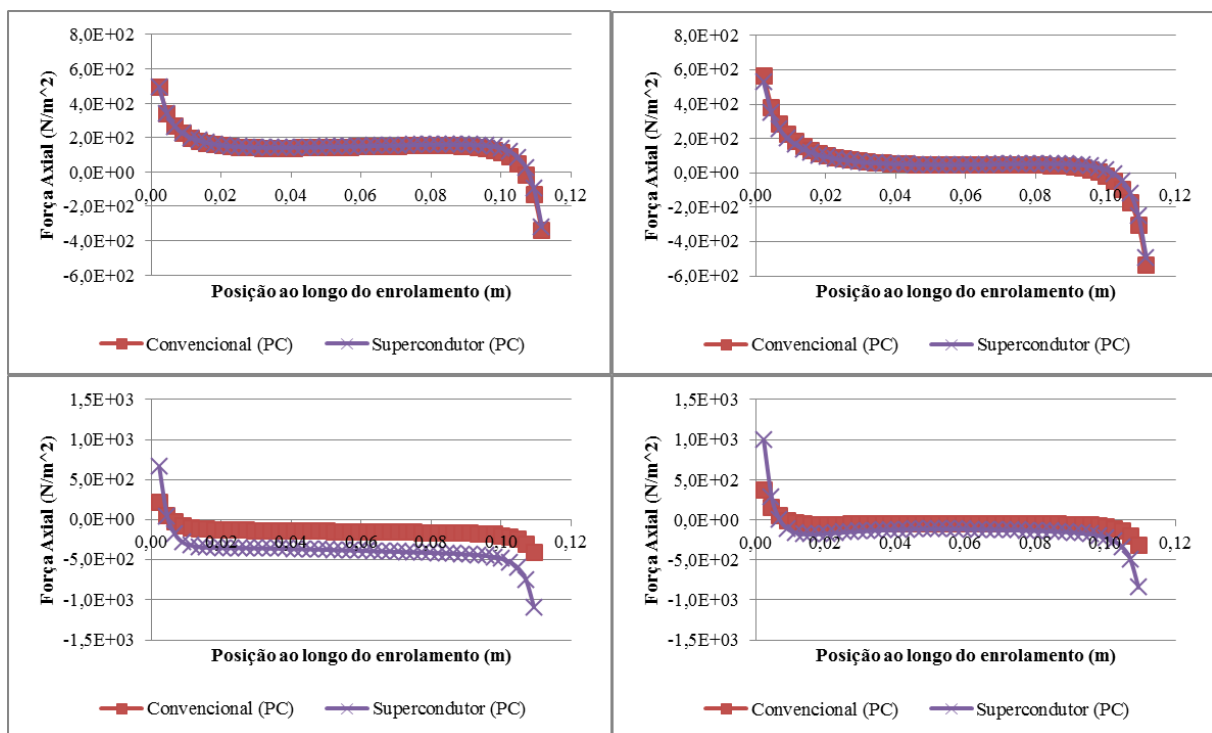


Figura 3.60: Forças axiais na terceira fase do transformador convencional e do supercondutor, em situação de plena carga. De cima para baixo, esquerda e direita do enrolamento primário, esquerda e direita do secundário.

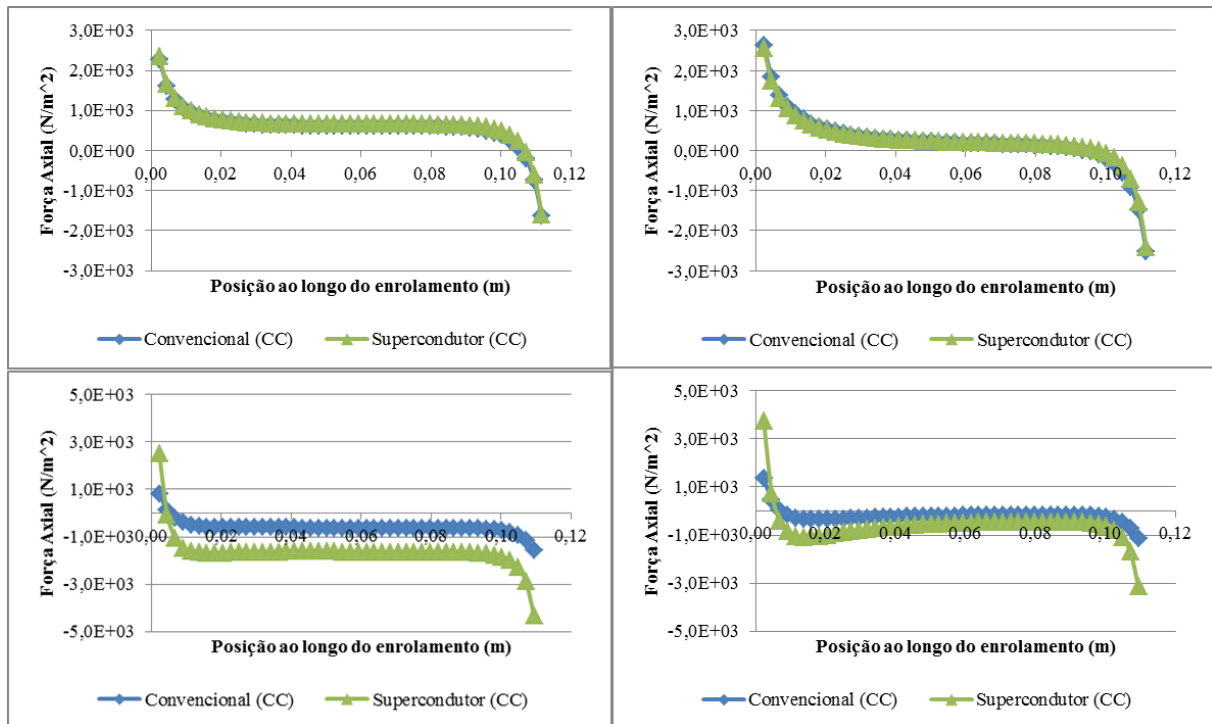


Figura 3.61: Forças axiais na terceira fase do transformador convencional e do supercondutor, em situação de curto-circuito. De cima para baixo, esquerda e direita do enrolamento primário, esquerda e direita do secundário.

Com base na Figura 3.14, das curvas de elasticidades, e sabendo que o transformador trifásico utiliza enrolamentos com os mesmos materiais do transformador monofásico obtêm-se as tabelas Tabela 3.5, Tabela 3.6 e Tabela 3.7, com os valores máximos de tensão mecânica existentes nos enrolamentos, para a situação crítica de funcionamento, curto-circuito, e as percentagens que relacionam estes valores ao limite de tensão, “*yield*”.

Tabela 3.5: Comparação da tensão mecânica obtida por simulação nos enrolamentos do transformador trifásico, com o limite admissível.

| Secção de Bobina | TC | | TSC | |
|--------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | F [N/m ²] | F/yield(%) | F [N/m ²] | F/yield(%) |
| Esquerda do Primário (Fase1) | 0,348 | $4,97 \times 10^{-7}$ | 0,306 | $4,37 \times 10^{-7}$ |
| Direita do Primário (Fase1) | 0,358 | $5,11 \times 10^{-7}$ | 0,259 | $3,70 \times 10^{-7}$ |
| Esquerda do Secundário (Fase1) | 0,105 | $1,50 \times 10^{-7}$ | 0,483 | $4,36 \times 10^{-7}$ |
| Direita do Secundário (Fase1) | 0,089 | $1,27 \times 10^{-7}$ | 0,320 | $2,86 \times 10^{-7}$ |
| Esquerda do Primário (Fase2) | 2544,01 | $3,63 \times 10^{-3}$ | 2626,25 | $3,75 \times 10^{-3}$ |
| Direita do Primário (Fase2) | 2513,85 | $3,59 \times 10^{-3}$ | 2634,97 | $3,76 \times 10^{-3}$ |
| Esquerda do Secundário (Fase2) | 2476,52 | $3,54 \times 10^{-3}$ | 8191,12 | $7,31 \times 10^{-3}$ |
| Direita do Secundário (Fase2) | 2501,97 | $3,57 \times 10^{-3}$ | 8237,48 | $7,35 \times 10^{-3}$ |
| Esquerda do Primário (Fase3) | 2486,72 | $3,55 \times 10^{-3}$ | 2618,91 | $3,74 \times 10^{-3}$ |
| Direita do Primário (Fase3) | 2798,21 | $3,99 \times 10^{-3}$ | 2722,99 | $3,89 \times 10^{-3}$ |
| Esquerda do Secundário (Fase3) | 2478,41 | $3,54 \times 10^{-3}$ | 8179,55 | $3,30 \times 10^{-3}$ |
| Direita do Secundário (Fase3) | 2437,89 | $3,48 \times 10^{-3}$ | 8105,58 | $3,24 \times 10^{-3}$ |

Tabela 3.6: Comparação da tensão mecânica obtida por simulação nos enrolamentos do transformador trifásico com derivação, com o limite admissível.

| Secção de Bobina | TC | | TSC | |
|--------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | F [N/m ²] | F/yield(%) | F [N/m ²] | F/yield(%) |
| Esquerda do Primário (Fase1) | 0,248 | $3,54 \times 10^{-7}$ | 0,055 | $7,86 \times 10^{-8}$ |
| Direita do Primário (Fase1) | 3,605 | $5,15 \times 10^{-6}$ | 3,145 | $4,49 \times 10^{-6}$ |
| Esquerda do Secundário (Fase1) | 0,009 | $1,29 \times 10^{-8}$ | 0,179 | $1,59 \times 10^{-7}$ |
| Direita do Secundário (Fase1) | 0,234 | $3,34 \times 10^{-7}$ | 7,468 | $4,67 \times 10^{-6}$ |
| Esquerda do Primário (Fase2) | 2856,18 | $4,08 \times 10^{-3}$ | 3099,65 | $4,43 \times 10^{-3}$ |
| Direita do Primário (Fase2) | 2889,06 | $4,13 \times 10^{-3}$ | 3128,83 | $4,47 \times 10^{-3}$ |
| Esquerda do Secundário (Fase2) | 4093,13 | $5,85 \times 10^{-3}$ | 12329,85 | $1,10 \times 10^{-2}$ |
| Direita do Secundário (Fase2) | 4127,45 | $5,89 \times 10^{-3}$ | 12447,00 | $1,11 \times 10^{-2}$ |
| Esquerda do Primário (Fase3) | 2558,57 | $3,66 \times 10^{-3}$ | 2695,85 | $3,85 \times 10^{-3}$ |
| Direita do Primário (Fase3) | 2784,75 | $3,98 \times 10^{-3}$ | 2684,49 | $3,83 \times 10^{-3}$ |
| Esquerda do Secundário (Fase3) | 2614,37 | $3,73 \times 10^{-3}$ | 8483,25 | $7,57 \times 10^{-3}$ |
| Direita do Secundário (Fase3) | 2436,41 | $3,48 \times 10^{-3}$ | 8124,84 | $7,25 \times 10^{-3}$ |

Tabela 3.7: Comparação da tensão mecânica obtida por simulação nos enrolamentos do transformador trifásico com desalinhamento, com o limite admissível.

| Secção de Bobina | TC | | TSC | |
|--------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | F [N/m ²] | F/yield(%) | F [N/m ²] | F/yield(%) |
| Esquerda do Primário (Fase1) | 0,384 | $5,49 \times 10^{-7}$ | 0,336 | $4,80 \times 10^{-7}$ |
| Direita do Primário (Fase1) | 1,857 | $2,65 \times 10^{-6}$ | 1,621 | $2,32 \times 10^{-6}$ |
| Esquerda do Secundário (Fase1) | 0,100 | $1,43 \times 10^{-7}$ | 0,432 | $3,86 \times 10^{-7}$ |
| Direita do Secundário (Fase1) | 0,662 | $9,46 \times 10^{-7}$ | 2,486 | $2,22 \times 10^{-7}$ |
| Esquerda do Primário (Fase2) | 2956,19 | $4,22 \times 10^{-3}$ | 3050,15 | $4,36 \times 10^{-3}$ |
| Direita do Primário (Fase2) | 2994,03 | $4,28 \times 10^{-3}$ | 3094,79 | $4,42 \times 10^{-3}$ |
| Esquerda do Secundário (Fase2) | 2600,96 | $3,72 \times 10^{-3}$ | 8318,88 | $7,43 \times 10^{-3}$ |
| Direita do Secundário (Fase2) | 2634,69 | $3,76 \times 10^{-3}$ | 8404,79 | $7,50 \times 10^{-3}$ |
| Esquerda do Primário (Fase3) | 2961,93 | $4,26 \times 10^{-3}$ | 3066,80 | $4,38 \times 10^{-3}$ |
| Direita do Primário (Fase3) | 2994,90 | $4,28 \times 10^{-3}$ | 2985,80 | $4,27 \times 10^{-3}$ |
| Esquerda do Secundário (Fase3) | 2591,14 | $3,70 \times 10^{-3}$ | 8343,65 | $7,45 \times 10^{-3}$ |
| Direita do Secundário (Fase3) | 2453,46 | $3,50 \times 10^{-3}$ | 8146,11 | $7,27 \times 10^{-3}$ |

A partir das tabelas acima verifica-se que os valores de forças presentes nos enrolamentos encontram-se bastante distantes do limite de elasticidade dos materiais. Confirma-se que os esforços resultantes dos ensaios nos transformadores com deslocação axial não sofrem grandes alterações quando comparados com os resultantes das simulações no transformador original. Comparando os resultados dos transformadores com derivação e os do transformador ideal, pode-se concluir que existe um incremento acentuado no secundário da segunda fase, e é neste enrolamento que existe maior perigo de danos.

3.3 Análise dos esforços em limitadores

À semelhança da secção anterior, serão estudados os esforços desenvolvidos em dois tipos de limitadores de corrente supercondutores.

3.3.1 Limitador de corrente supercondutor de núcleos saturados

3.3.1.1 Aspectos físicos e modelo de simulação

O LCS de núcleos saturados descrito em (Vilhena, 2012) é constituído por um núcleo com características semelhantes à do utilizado no transformador trifásico referido na secção 3.2.2 e três bobinas, uma a funcionar em regime DC e duas em AC, segundo a configuração ilustrada no modelo de simulação do FLUX2D da Figura 3.62. Encontram-se representadas na figura, para além das dimensões do núcleo (em 2D e em [mm]) a malha de elementos finitos. A azul observa-se o núcleo, a vermelho a bobina DC e a laranja os enrolamentos AC. De igual forma, as bobinas são modelizadas como sendo cada uma composta por duas placas, uma à esquerda e outra à direita. É definida também neste modelo uma profundidade de 60 mm. Como em todos os casos estudados, a malha de elementos finitos utilizada, é muito mais fina em zonas onde as variações dos valores de densidade de fluxo magnético são mais elevadas.

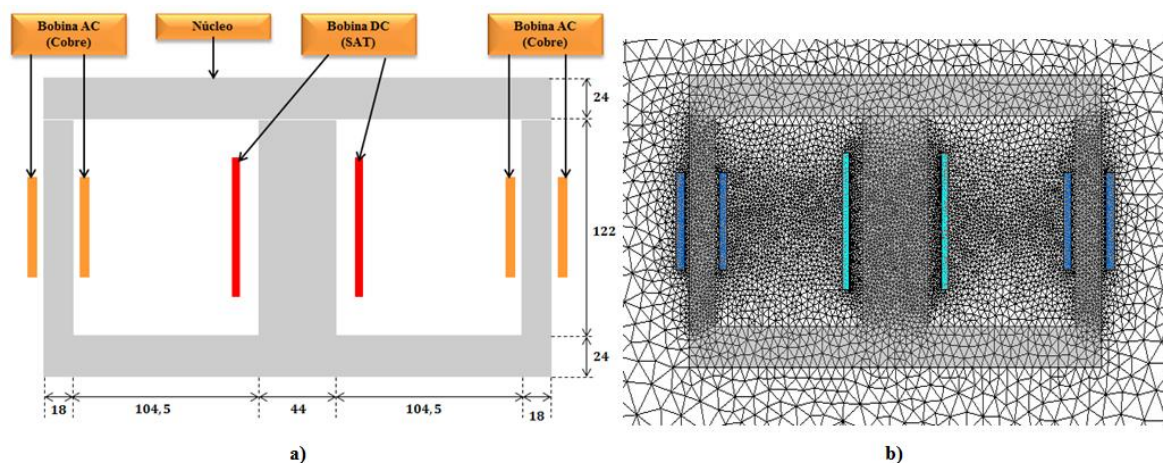


Figura 3.62: a) Modelo de simulação do LCS de núcleo saturados. b) Modelo com malha de elementos finitos. Adaptado de (Vilhena, 2012).

Tal como nos casos anteriores, o núcleo deste LCS, é composto por duas regiões magnéticas não condutoras, mas neste modelo existe uma separação, ou entreferro, entre a travessa e o resto do núcleo, representado pela linha branca de 0,01 mm de largura. O material magnético utilizado neste modelo é o representado pela característica dada na Figura 3.5.

As zonas geométricas que representam as bobinas foram definidas como regiões condutoras, de cobre no caso dos enrolamentos AC e supercondutor no caso do enrolamento DC. Estas zonas geométricas, apresentam as orientações das correntes de forma contrária, à semelhança dos outros estudos, sendo os sentidos das correntes orientados positivamente à esquerda e negativamente à direita. Os enrolamentos AC são constituídos por 45 espiras de fio de cobre, e o enrolamento DC 50 espiras de SAT Bi-2223 com as características apresentadas na Tabela 3.1.

As corretas execuções de simulações neste LCS encontra-se ligada ao circuito que o define, representado na Figura 3.63. Aí podem ser observadas duas bobinas fictícias associadas a cada enrolamento, equivalentes a cada placa do desenho 2D ($L1_{Esquerda}$, $L1_{Direita}$, $L2_{Esquerda}$, $L2_{Direita}$, $LDC_{Esquerda}$, $LDC_{Direita}$), pelas mesmas razões apresentadas nas secções anteriores. As resistências representam a impedância da linha (R_{Linha}), a

ligação eléctrica do circuito de ensaio do LCS ao circuito de polarização exigida pelo simulador (R_{linh}), (R_{carga}) a impedância da carga à qual se encontra ligado o LCS e finalmente uma impedância (R_{BIAS}) que define a corrente imposta ao circuito, visto que a resistência da bobina supercondutora é muito baixa. Foi representado o interruptor (S_1) que têm como função realizar a simulação da situação de curto-circuito. Pode observar-se também uma fonte de alimentação AC, (V_1), e uma outra fonte (V_{DC}), que realiza a alimentação do circuito no qual está inserida a bobina DC.

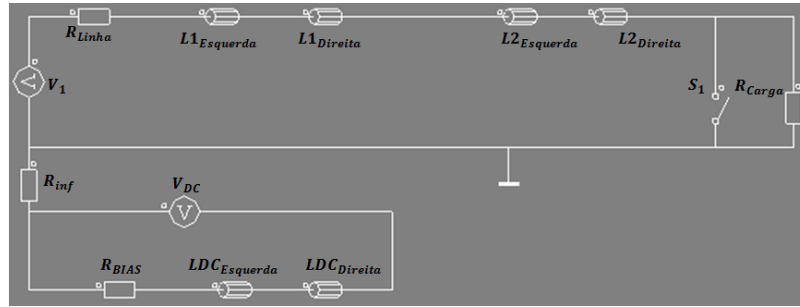


Figura 3.63: Esquema eléctrico do LCS de núcleos saturados.

A caracterização e o dimensionamento detalhado do LCS de núcleo saturado em estudo encontra-se em (Vilhena, 2012).

3.2.1.2 Resultados obtidos por simulação

O estudo do comportamento das magnitudes das forças nos enrolamentos do LCS indutivo de núcleos saturados é realizado por meio de uma simulação com as especificações representadas na Tabela 3.8. De igual forma que nos transformadores todas as simulações foram efectuadas com passo de 1 ms em um intervalo de 0,5 s, gerando 501 passos. A tensão de entrada aplicada é sinusoidal de forma $u(t) = U_{ef} \cdot \text{sen}(2\pi \cdot f \cdot t)$. O curto-circuito simulado neste dispositivo é gerado pelo fecho do interruptor (S_1) por um período de 120 ms com início em $t = 80$ ms e fim em $t = 200$ ms. É efectuada a análise dos resultados em um instante dentro do intervalo de falha, $t = 115$ ms, e após a recuperação, em $t = 0,5$ s.

Tabela 3.8: Especificações utilizadas nas simulações do LCS de núcleos saturados. Adaptado de (Vilhena, 2012).

| Parâmetro | Valor |
|---|-------------|
| Fonte de Alimentação AC [V] | 50 |
| Resistência da Linha [Ω] | 0,5 |
| Resistência da Carga [Ω] | 20 |
| Resistência Infinita [Ω] | $10^{(9)}$ |
| Resistência de <i>bias</i> [Ω] | 1 |
| Resistência das Bobinas AC [Ω] | 0,15 |
| Resistência da Bobina DC [Ω] | $10^{(-9)}$ |
| Fonte de Alimentação DC [V] | 40 |

Para as especificações apresentadas, verifica-se que no instante em que existe curto-circuito a corrente é aproximadamente 17 vezes maior que a corrente em funcionamento normal. Esta corrente valida o correcto funcionamento do LCS, visto que em relação a corrente prospectiva de amplitude,

$$I_p = \frac{\sqrt{2} \cdot 50}{0.5} = 141 \text{ A, a corrente obtida na limitação representa 78,7\% de limitação.}$$

Observa-se na Figura 3.64 (a, b), as distribuições de densidade de fluxo magnético no transformador convencional e no supercondutor, para os instantes de tempo escolhidos. Em Figura 3.64 a), o LCS encontra-se em presença de uma falha, e em Figura 3.64 b), já está recuperado do curto-circuito.

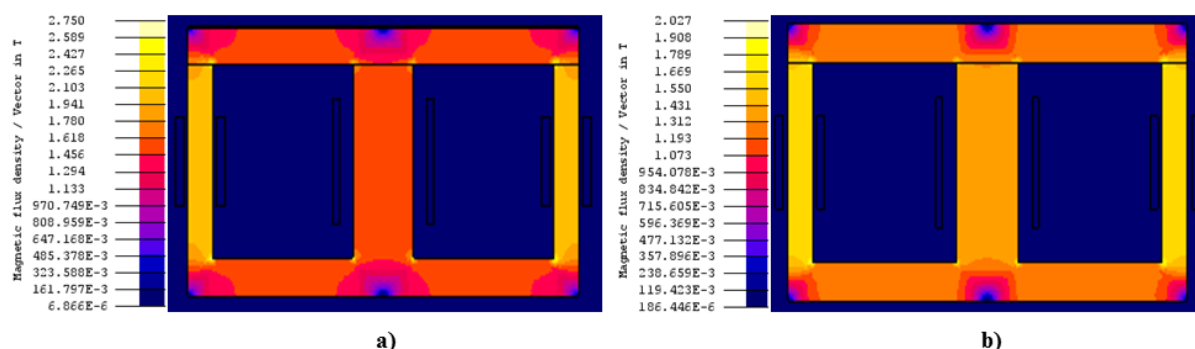


Figura 3.64: Distribuição da densidade de fluxo magnético em LCS de núcleos saturados. a) Funcionamento em falha. b) Funcionamento normal.

É apreciável na imagem acima que em ambos os pontos de simulação, a distribuição da densidade de fluxo magnético é superior na coluna central, isto é, a segunda fase. Também que em situação de uma falha com as características já descritas, o limitador apresenta valores de indução magnética muito mais elevados que em funcionamento normal, pelo que o LCS encontra-se em uma zona onde a saturação do núcleo é ainda mais intensa.

Na Figura 3.65 (a, b), encontram-se os vectores que representam a densidade de fluxo magnético de dispersão existente nos enrolamentos, fazendo-se notar que perante um curto-circuito a intensidade da indução magnética de dispersão é aproximadamente o dobro da existente no funcionamento sem falha.

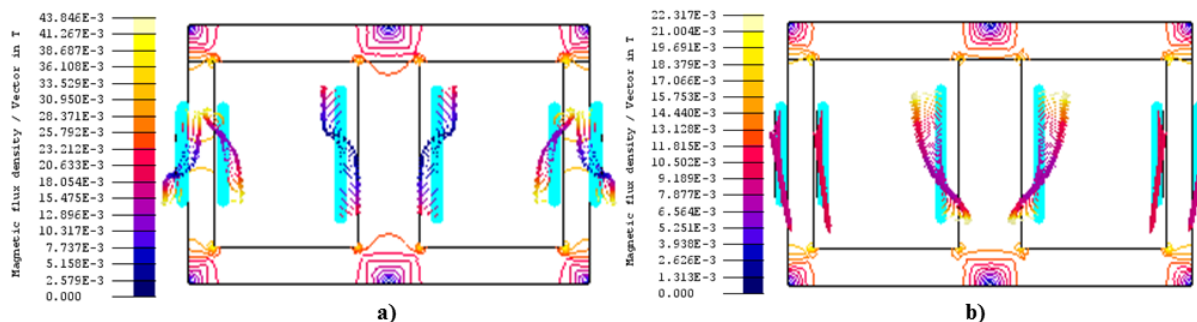


Figura 3.65: Vectores de fluxo magnético de dispersão presentes nos enrolamentos do LCS de núcleos saturados. a) Funcionamento em falha. b) Funcionamento normal.

A semelhança do método de estudo dos esforços existentes nos enrolamentos, nos limitadores utiliza-se como ferramenta de apoio caminhos localizados no interior de cada região representativa das bobinas, sendo possível assim a diferenciação entre as magnitudes das forças à esquerda ou à direita de cada enrolamento.

Os comportamentos dos vectores de força presentes nas bobinas encontram-se representados na Figura 3.66 (a, b). Neste limitador de núcleos saturados é possível observar que durante a ocorrência de falha os valores das forças são mais elevados nos enrolamentos AC, e sem falha no DC. Assim como são mais intensos a medida que existe aproximação dos extremos das bobinas, sendo que em a) chegam a assumir valores que são o triplo dos esforços em b).

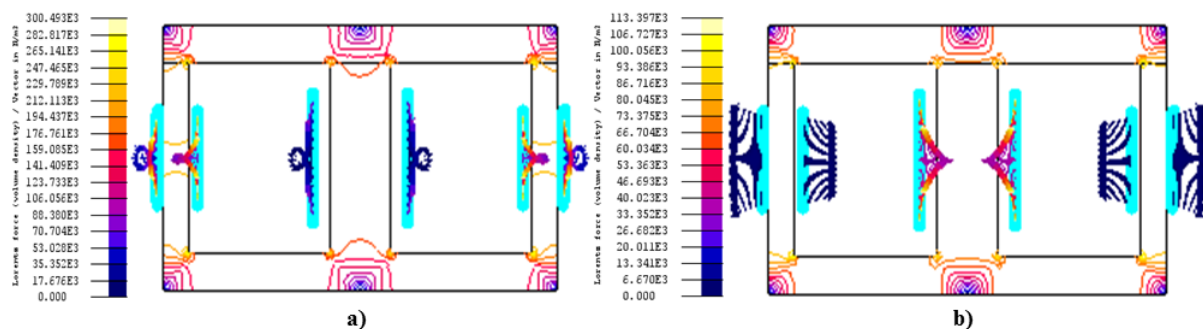


Figura 3.66: Vectores de força presentes nos enrolamentos do LCS de núcleos saturados. a) Funcionamento em falha. b) Funcionamento normal.

A semelhança dos casos anteriores a identificação dos esforços, forças radiais e/ou axiais, é realizada a partir dos dados fornecidos pelo *software* FLUX2D. Os gráficos resultantes das simulações são apresentados na Figura 3.67-3.70 em Newton por unidade de área N/m^2 . Considera-se como origem de referência o extremo inferior de cada enrolamento, assim como forças de compressão ou tracção consoante os sentidos sejam positivos ou negativos, respectivamente.

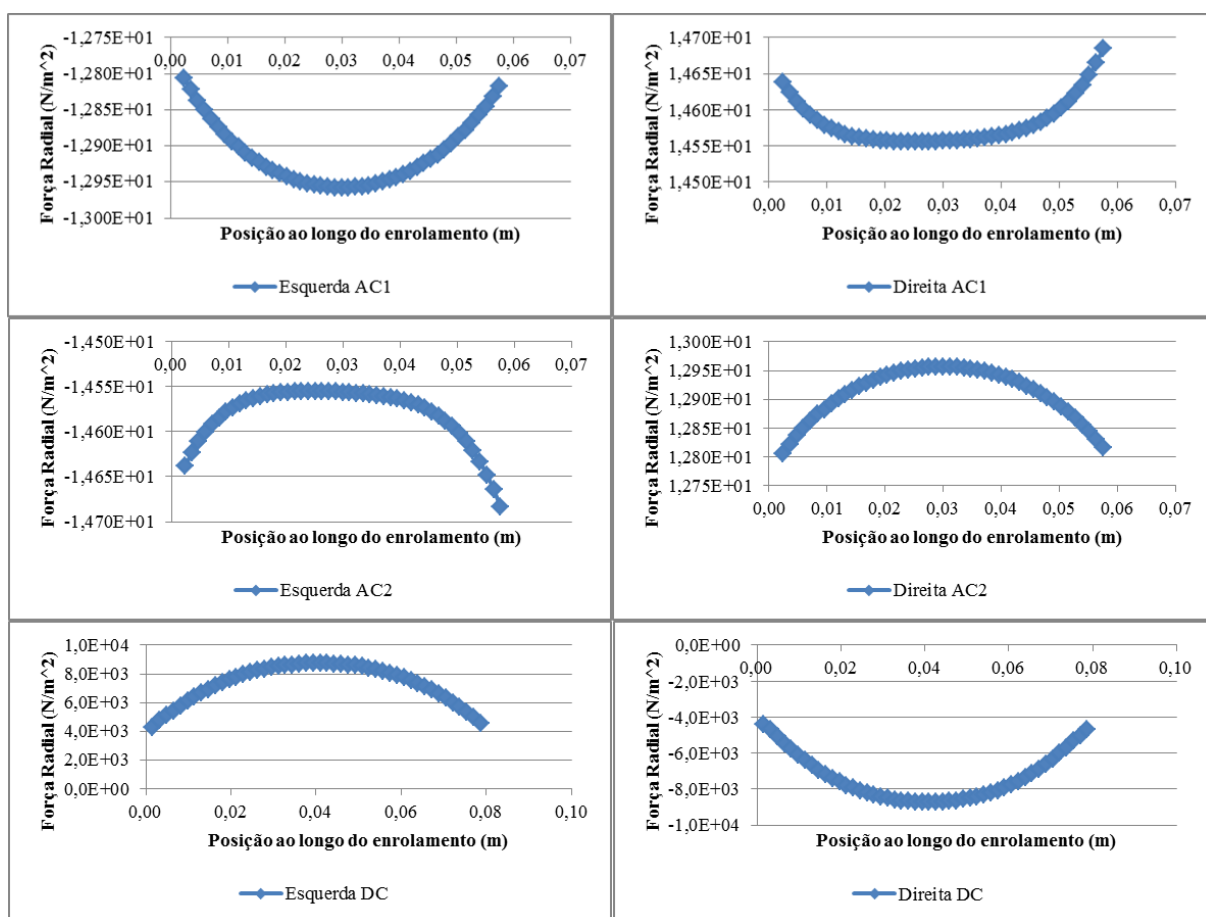


Figura 3.67: Forças radiais nos enrolamentos do LCS em funcionamento normal.

Os gráficos representados em Figura 3.67, ilustra que em funcionamento normal os enrolamentos externos às janelas do limitador, Esquerda AC1 e Direita AC2, são afectados por forças radiais cujos valores crescem ao se aproximar do centro do enrolamento e voltam a decrescer quanto mais perto do extremo superior. Enquanto, as regiões localizadas no interior da janela do LCS, Direita AC1 e Esquerda AC2, verificam esforços elevados nas proximidades dos extremos da bobina, e ainda, mais intensos nas espiras mais distantes. Também são observadas as curvas das forças radiais no

enrolamento de polarização, Esquerda DC e Direita DC, as quais têm comportamento semelhante aos enrolamentos externos ao limitador mas valores de força superiores em três ordens de grandeza.

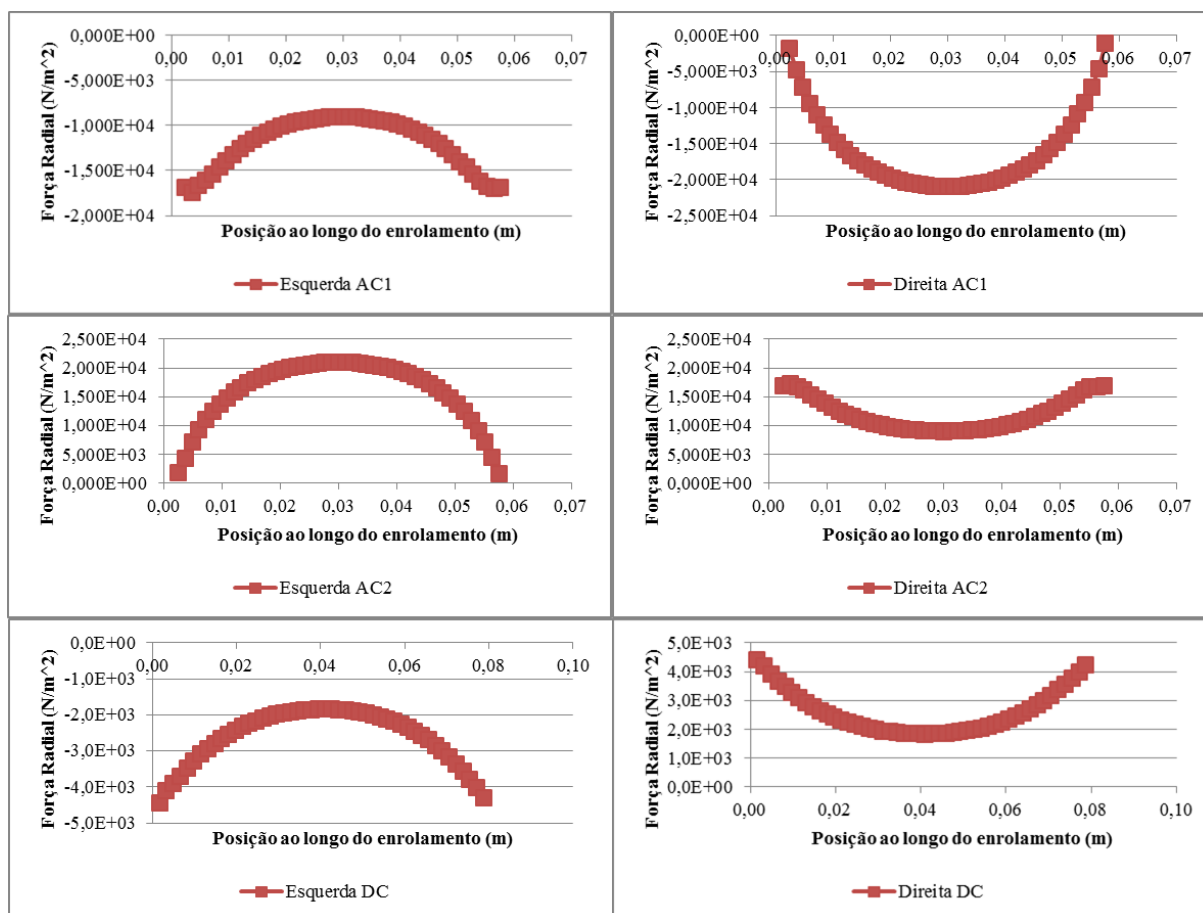


Figura 3.68: Forças radiais nos enrolamentos do LCS em presença de falha.

Analisando os gráficos das forças radiais na situação de curto-circuito representados em Figura 3.68 verifica-se que em presença de um curto-circuito, as regiões Esquerda AC1 e Direita AC2, assumem maiores valores de força nos extremos dos enrolamentos. A variação destas intensidades em relação às existentes em funcionamento normal é de aproximadamente três ordens de grandeza. Verifica-se também, que as zonas internas à janela do LCS passam a ter no centro da altura do enrolamento valores superiores de esforço. De igual forma observa-se um aumento de três ordens de grandeza nos valores das forças radiais. Perante falha o enrolamento de polarização possui forças radiais mais elevadas nos extremos, mas a diferença dos enrolamentos ligados à rede, neste a intensidade dos esforços sofrem uma redução de metade do valor existente em funcionamento normal.

A Figura 3.69 ilustra as forças axiais presentes nos enrolamentos do LCS em funcionamento normal. Nesta condição, as bobinas AC exibem esforços axiais de baixa intensidade, com máximos nos extremos dos enrolamentos, onde se fecham as linhas de campo de indução magnético. No entanto o enrolamento DC apresenta esforços elevados, consoante a aproximação aos extremos da bobina, estas forças encontram-se na ordem das dezenas de milhar de N/m^2 .

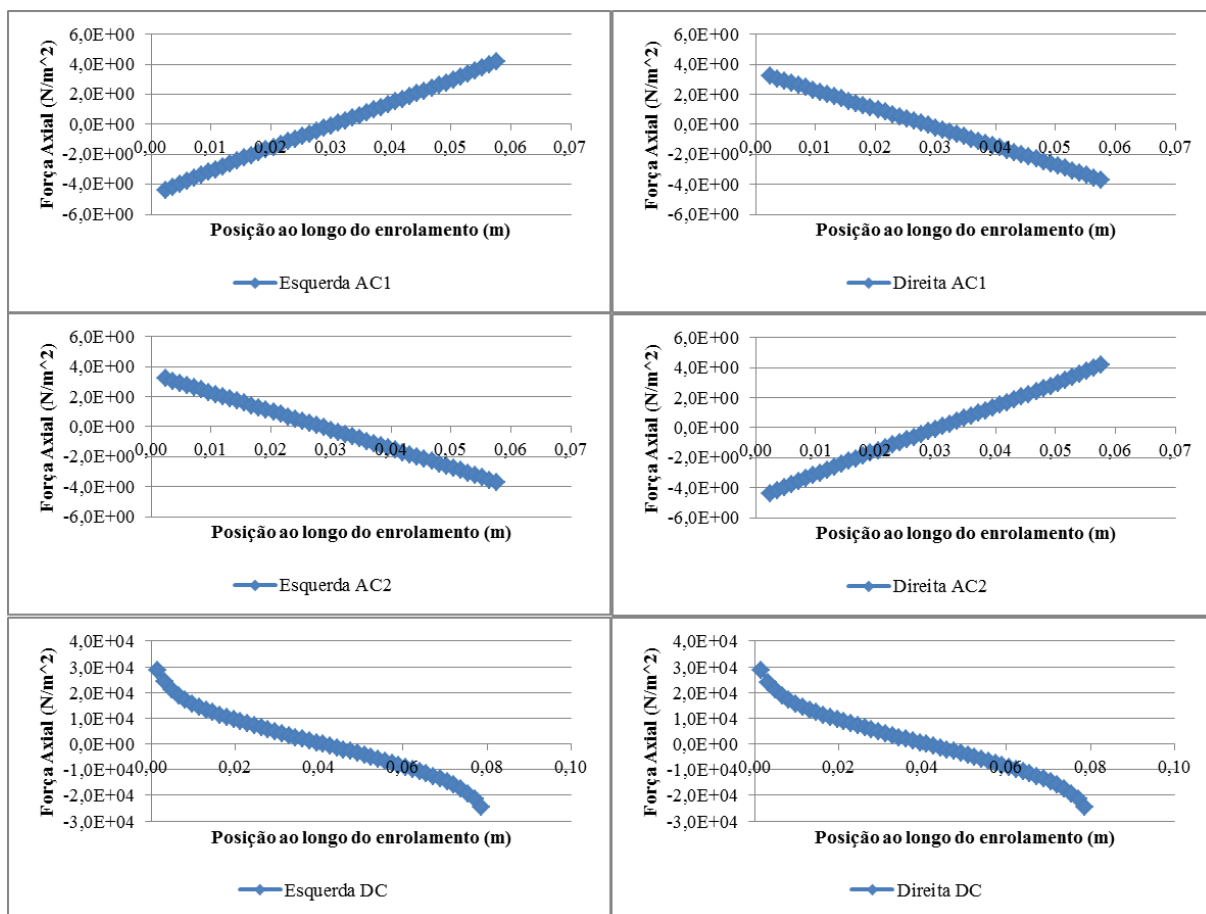


Figura 3.69: Forças axiais nos enrolamentos do LCS em funcionamento normal.

Encontram-se na Figura 3.70 as curvas que representam as forças axiais nos enrolamentos para o funcionamento em curto-circuito. No enrolamento de polarização DC observa-se que a curva de forças axiais não sofre quase nenhuma alteração, somente uma ligeira redução nos valores máximos de esforços existentes nos extremos do enrolamento. Relativamente aos enrolamentos AC pode-se concluir neste ensaio, que em todas as regiões das bobinas existe um aumento considerável dos esforços, de aproximadamente quatro ordens de grandeza de N/m^2 .

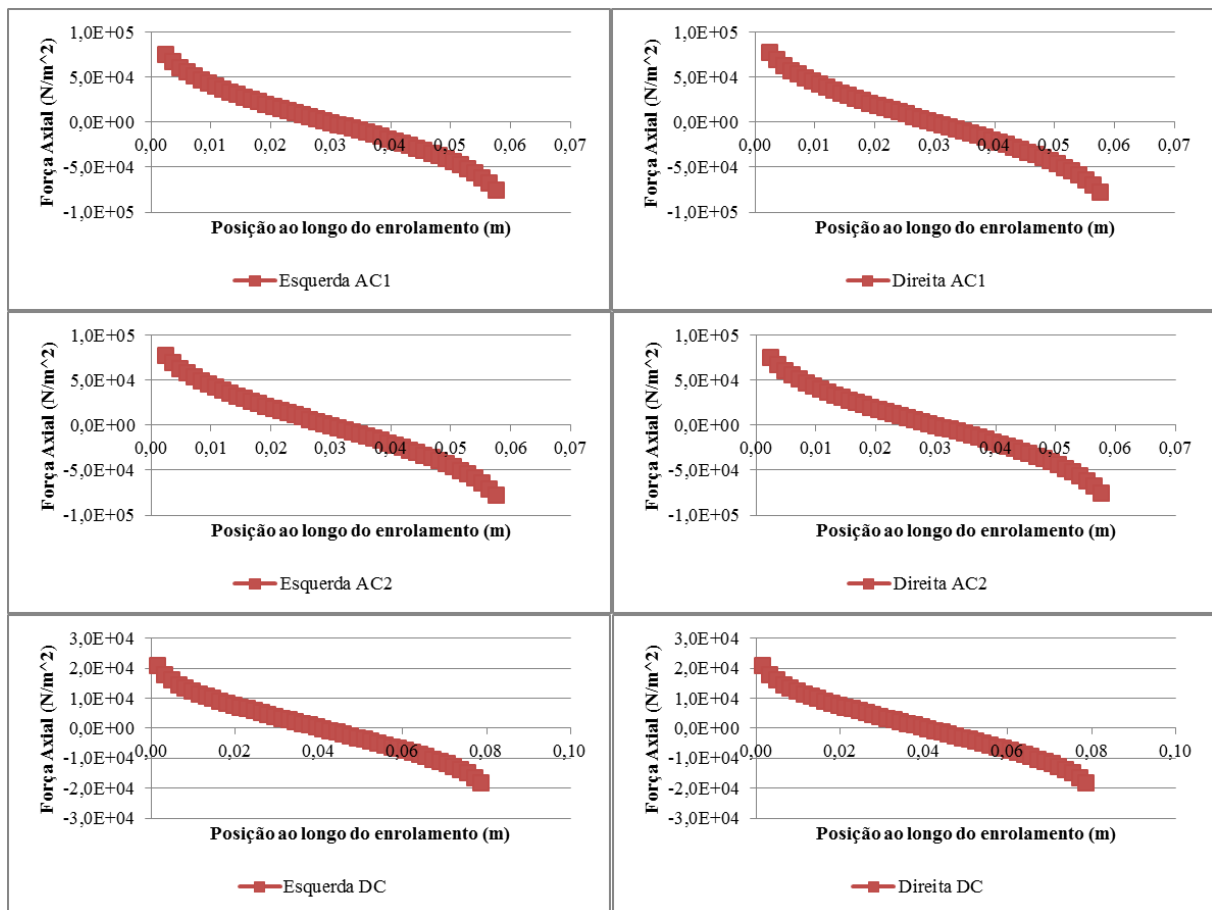


Figura 3.70: Forças axiais nos enrolamentos do LCS em presença de falha.

Devido a que após a saturação do núcleo não existe indução magnética suficiente para contrariar o fluxo magnético gerado pelas correntes dos enrolamentos AC, comprova-se que os efeitos da concentração e sentidos das linhas de campo de indução magnético de dispersão, nas janelas do limitador, assim como o aumento das intensidades das correntes influenciam directamente os valores e orientações das forças.

Das curvas de elasticidades, representadas na Figura 3.14, e tendo em atenção que o LCS de núcleos saturados utiliza enrolamentos com os mesmos materiais dos dispositivos estudados anteriormente, obtém-se a Tabela 3.9. Pode observar-se que os valores máximos de tensão mecânica existentes nos enrolamentos, para a situação de curto-circuito, e as percentagens referentes a estes valores relativamente ao limite de tensão elástica, “*yield*”.

Tabela 3.9: Comparação da tensão mecânica obtida por simulação nos enrolamentos do LCS de núcleos saturados, com o limite admissível.

| Secção de Bobina | LCS indutivo de núcleo saturados | |
|------------------|----------------------------------|---------------------|
| | F [kN/m ²] | F/ <i>yield</i> (%) |
| Esquerda do AC1 | 77,24 | 0,110 |
| Direita do AC1 | 78,21 | 0,112 |
| Esquerda do AC2 | 78,35 | 0,112 |
| Direita do AC2 | 77,29 | 0,110 |
| Esquerda do DC | 21,68 | 0,019 |
| Direita do DC | 21,80 | 0,019 |

Com base na magnitude dos esforços existentes nos enrolamentos do LCS representados na Tabela 3.9 pode-se concluir que os enrolamentos de cobre ainda admitem força sem ficar danificados, pois as forças contabilizadas geram uma deformação muito longe do limite de elasticidade do material. Em relação ao material supercondutor verifica-se que admitem mais força pois a deformação provocada pela força contabilizada encontra-se longe do limite de elasticidade admissível pelo SAT.

3.3.2 Limitador de corrente indutivo baseado em fita supercondutora Bi-2223

3.3.2.1 Aspectos físicos e modelo de simulação

Este LCS indutivo é uma adaptação do descrito em (Arsénio, 2012), e é constituído por um núcleo ferromagnético também utilizado no transformador monofásico estudado na secção 3.2.1, e os enrolamentos são dispostos numa só coluna. Nesta dissertação é analisada somente a situação em que o primário apresenta 50 espiras e o secundário duas, visto que se prova na referência que o limitador apresenta um desempenho razoável e maior poder de limitação com este tipo de secundário. O enrolamento supercondutor em questão encontra-se na Figura 3.71.



Figura 3.71: Bobina supercondutora de duas espiras. Adaptado de (Arsénio, 2012).

O modelo de simulação definido para este LCS, Figura 3.72, o qual apresenta dimensões do núcleo (em 2D e em [mm]) equivalentes às que tem o protótipo real. Também é mostrada na figura referida, a malha de elementos finitos correspondente, com maior número de elementos finitos nas zonas de maior variação da densidade de fluxo magnético. O núcleo é representado por duas travessas e duas colunas, zonas azuis, sendo o enrolamento primário a vermelho e o secundário a laranja. Pode ser observado que as bobinas empregadas são modelizadas como sendo cada uma composta por duas placas, uma à esquerda e outra à direita. É definida uma profundidade de $(2\pi \cdot 35)/2$ mm, para a análise 3D que utiliza o *software*.

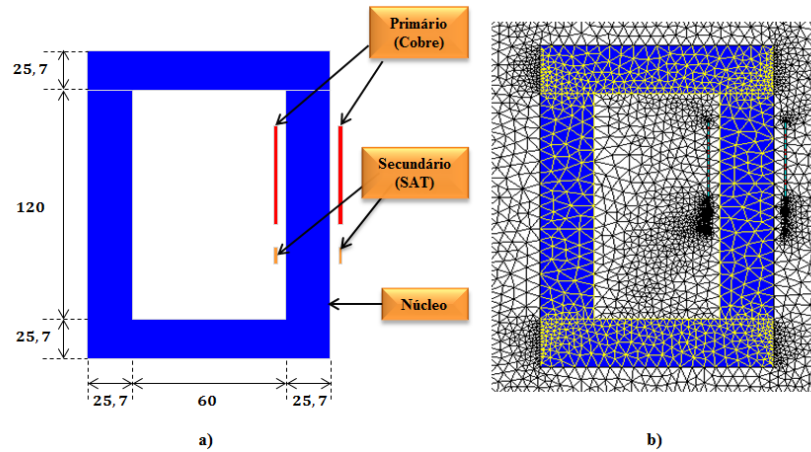


Figura 3.72: a) Modelo de simulação do LCS indutivo. b) Modelo com malha de elementos finitos.

Analogamente aos estudos realizados nas secções anteriores, o núcleo utilizado nas simulações apresentadas, é definido como sendo composto por regiões magnéticas não condutoras de material caracterizado pelo gráfico representado em Figura 3.5.

Os enrolamentos, primário e secundário, são definidos como regiões condutoras de cobre e material SC, respectivamente. As duas zonas geométricas que representam às bobinas exibem as correntes circulantes com orientações contrárias, ou seja, as partes à esquerda da bobina são orientados positivamente e as zonas à direita de cada bobina negativamente.

O circuito que simula a parte eléctrica do LCS em questão encontra-se exposto na Figura 3.73. Neste podem ser observadas duas bobinas fictícias associadas ao primário e ao secundário, equivalentes a cada placa do desenho 2D ($L1_{Esquerda}$, $L1_{Direita}$, $L2_{Esquerda}$, $L2_{Direita}$). O esquema eléctrico apresenta também três resistências, uma associada à impedância da linha (R_{Linha}), outra, de elevado valor, que estabelece uma ligação eléctrica da parte correspondente ao supercondutor ao restante circuito, situação esta exigida pelo simulador utilizado (R_{Inf}) e uma última que representa a impedância da carga à qual se encontra ligado o limitador (R_{Carga}). É representado também um interruptor (S_1), mediante o qual é executada a situação de falha. Pode-se observar também uma fonte de alimentação AC, (V_1).

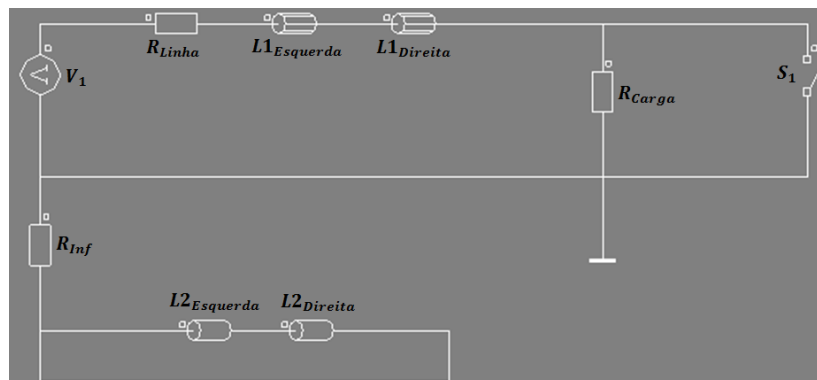


Figura 3.73: Esquema eléctrico do LCS indutivo.

Mais caracterizações do LCS indutivo em estudo, podem ser encontradas em (Arsénio, 2012).

3.2.2.2 Resultados obtidos por simulação

Na Tabela 3.10 encontram-se as especificações utilizadas na simulação do LCS indutivo em estudo, e que permitem a observação dos esforços nos enrolamentos deste dispositivo. Todas as simulações foram efectuadas com passo de 0,5 ms em um intervalo de 0,2 s, gerando 401 passos. A tensão de entrada aplicada é sinusoidal de forma $u(t) = U_{ef} \cdot \text{sen}(2\pi \cdot f \cdot t)$. Para a simulação da situação de curto-circuito, fecha-se o interruptor (S_1) no instante $t = 80$ ms e mantém-se assim 70 ms, voltando então ao funcionamento normal. A análise dos resultados é realizada no instante em que ocorre a falha, em $t = 0,086$ s, num instante em que existe limitação da corrente, em $t = 0,108$ s e após a recuperação, em $t = 0,165$ s.

Tabela 3.10: Especificações utilizadas nas simulações do transformador.

| Parâmetro | Valor |
|---|-----------|
| Fonte de Alimentação [V _{ef}] | 100 |
| Frequência [Hz] | 50 |
| Resistência da Linha [Ω] | 1 |
| Resistência da Carga [Ω] | 40 |
| Resistência do Primário [Ω] | 10^{-2} |

No instante em que existe curto-circuito a corrente é aproximadamente 37 vezes maior que a corrente em funcionamento normal. Após a limitação a corrente passa a ser aproximadamente 20 vezes maior à existente em normal funcionamento. Pode-se concluir então que a corrente obtida perante a falha em relação à prospectiva, de amplitude $I_p = \frac{\sqrt{2} \cdot 50}{1} = 70,71$ A, representa 68,1% de limitação na corrente.

Na Figura 3.74 (a, b, c), encontra-se a distribuição de densidade de fluxo magnético no limitador supercondutor indutivo com e sem a presença de corrente de curto-circuito.

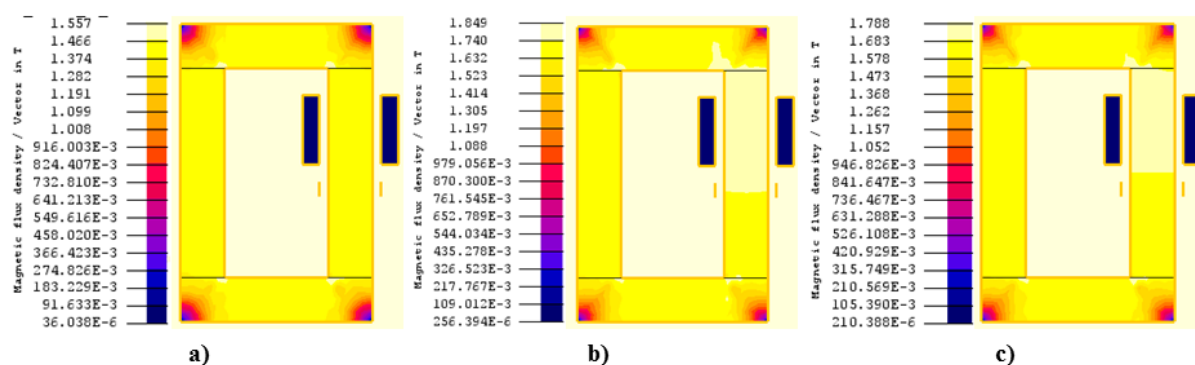


Figura 3.74: Densidade de fluxo magnético em LCS indutivo. a) Funcionamento normal. b) Funcionamento no primeiro pico de corrente de curto-circuito. c) Funcionamento com corrente de curto-circuito limitada.

Para o LCS em questão verifica-se um aumento nos valores da densidade de fluxo magnético na região envolvida pelo enrolamento primário, quando comparadas as situações de funcionamento normal e funcionamento perante corrente de curto-circuito. Contudo, a distribuição do fluxo mantém-se relativamente equilibrado no dispositivo.

Na Figura 3.75 (a, b, c), observam-se vectores que representam a densidade de fluxo de dispersão existente nos enrolamentos. Para esta topologia de LCS verifica-se que os valores mais elevados encontram-se entre o primário e o secundário, região na qual existe maior concentração de linhas de fluxo a fecharem-se. Uma característica distintiva na situação de falha é que o máximo de indução magnética sofre um incremento, chegando a tomar valores aproximadamente 3 ou 4 vezes maior que em funcionamento normal.

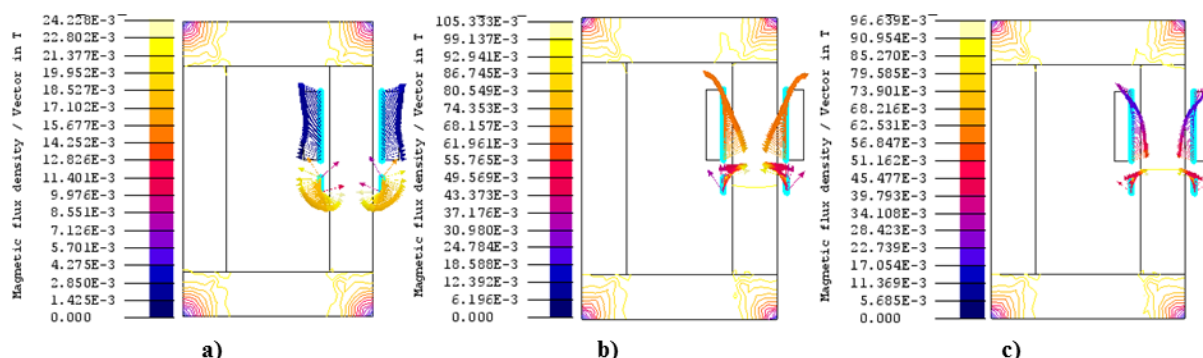


Figura 3.75: Vectores de fluxo de dispersão presentes nos enrolamentos do LCS indutivo. a) Funcionamento normal. b) Funcionamento no primeiro pico de corrente de curto-circuito. c) Funcionamento com corrente de curto-circuito limitada.

A Figura 3.76 (a, b, c) mostra o comportamento dos vectores de força presentes nos enrolamentos, assim como as respectivas magnitudes, permitindo verificar uma vez mais a proporcionalidade directa que existe entre esta grandeza e o fluxo magnético de dispersão presente no interior da bobina. Pode observar-se que os esforços nos enrolamentos deste LCS sofrem um aumento de aproximadamente 10 vezes o valor das forças em normal funcionamento. De forma geral estas forças presentes nas bobinas do limitador mostram intensidades superiores no secundário.

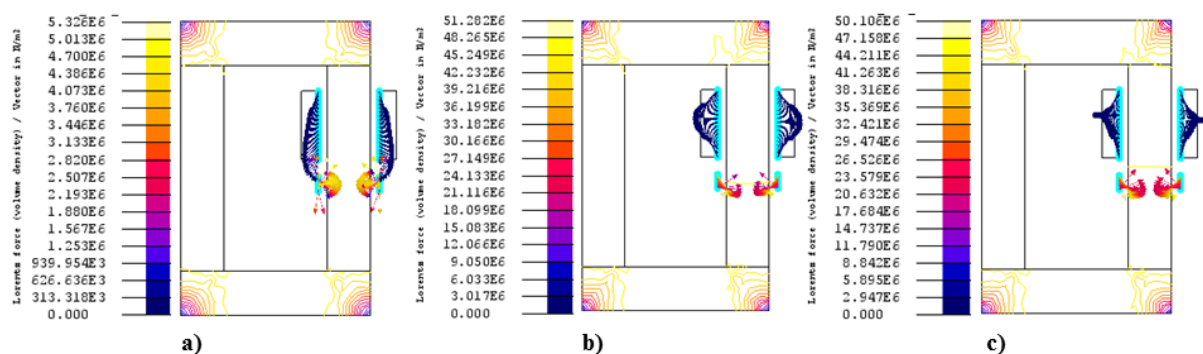


Figura 3.76: Vectores de força presentes nos enrolamentos do LCS indutivo. a) Funcionamento normal. b) Funcionamento no primeiro pico de corrente de curto-circuito. c) Funcionamento com corrente de curto-circuito limitada.

São apresentados em Figura 3.77-3.82, os gráficos das componentes radiais e axiais das forças nos enrolamentos do limitador indutivo. Considera-se como origem de referência o extremo inferior do primário e o extremo superior do secundário.

Quando o LCS indutivo se encontra em funcionamento normal, ilustrado na Figura 3.77, observa-se o que os esforços radiais apresentam os seus máximos aproximadamente no médio da altura dos enrolamentos e diminuem consoante exista uma aproximação aos extremos. Ainda verifica-se que as forças apresentam valores mais intensos na região entre eles, i.e., entre o extremo inferior do primário e o extremo superior do secundário. Também é apreciável a diferença de intensidade entre os

esforços no primário e no secundário, sendo neste último aproximadamente 3 ou 4 ordens de grandeza superior.

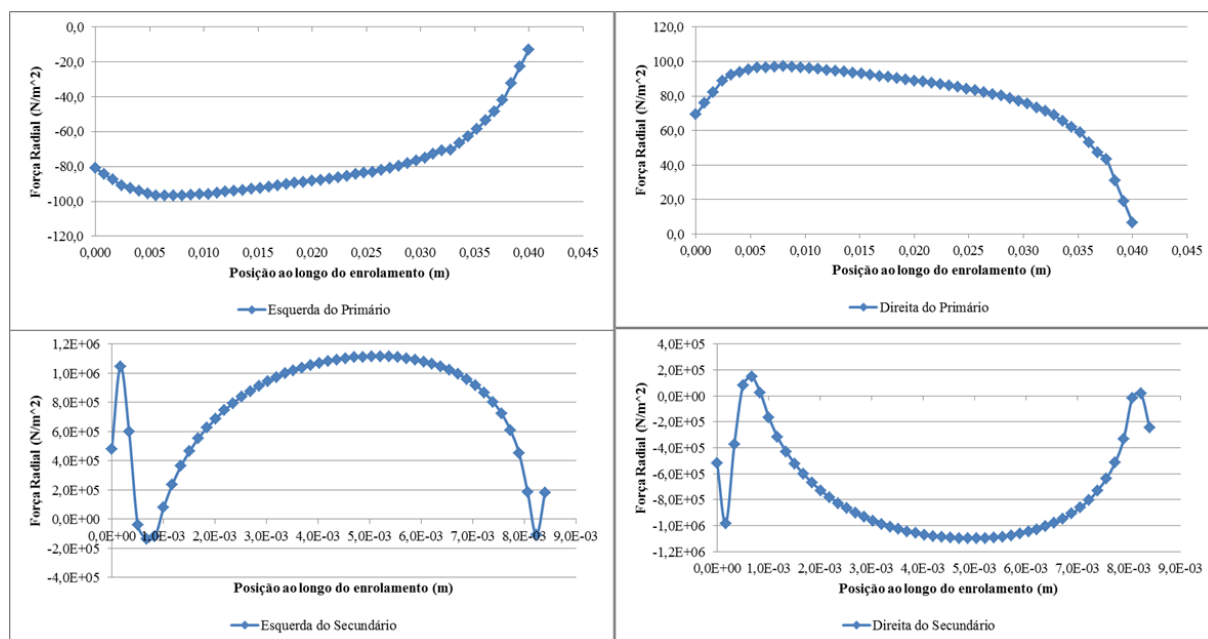


Figura 3.77: Forças radiais nos enrolamentos do LCS em funcionamento normal.

Para a situação do pico de corrente de curto-circuito, exibida na Figura 3.78, observa-se que à semelhança do que acontece no funcionamento normal as forças radiais são maiores ao longo da altura dos enrolamentos. Mas a diferença da primeira situação, já não é visível grande diferença entre os esforços existente nos extremos dos enrolamentos. Também pode-se assinalar que no secundário o comportamento dos esforços é quase linear na maior parte da altura do enrolamento. De forma geral verificam-se valores de força que rondam os MN/m².

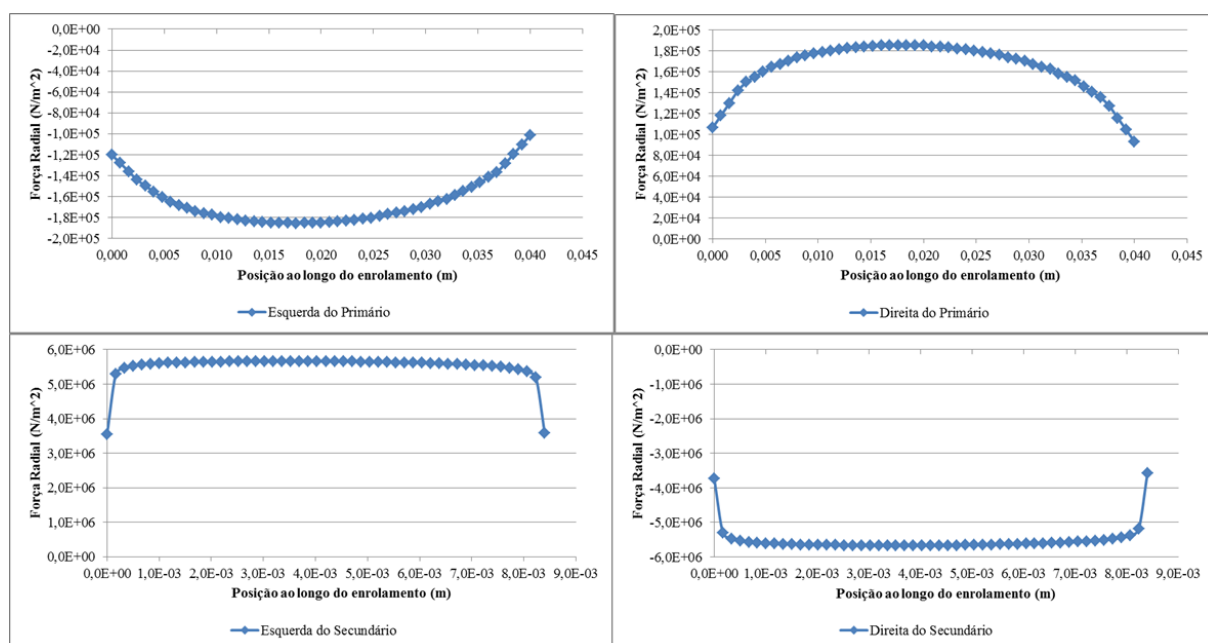


Figura 3.78: Forças radiais nos enrolamentos do LCS no pico de corrente de curto-circuito.

Na Figura 3.79 encontram-se representados os esforços existentes nos enrolamentos após a limitação da corrente de curto-circuito. O comportamento destes esforços é semelhante ao obtido na

situação anterior, diferenciando-se pela diminuição das intensidades das forças no primário e pela presença de uma linearização dos esforços nesse enrolamento.

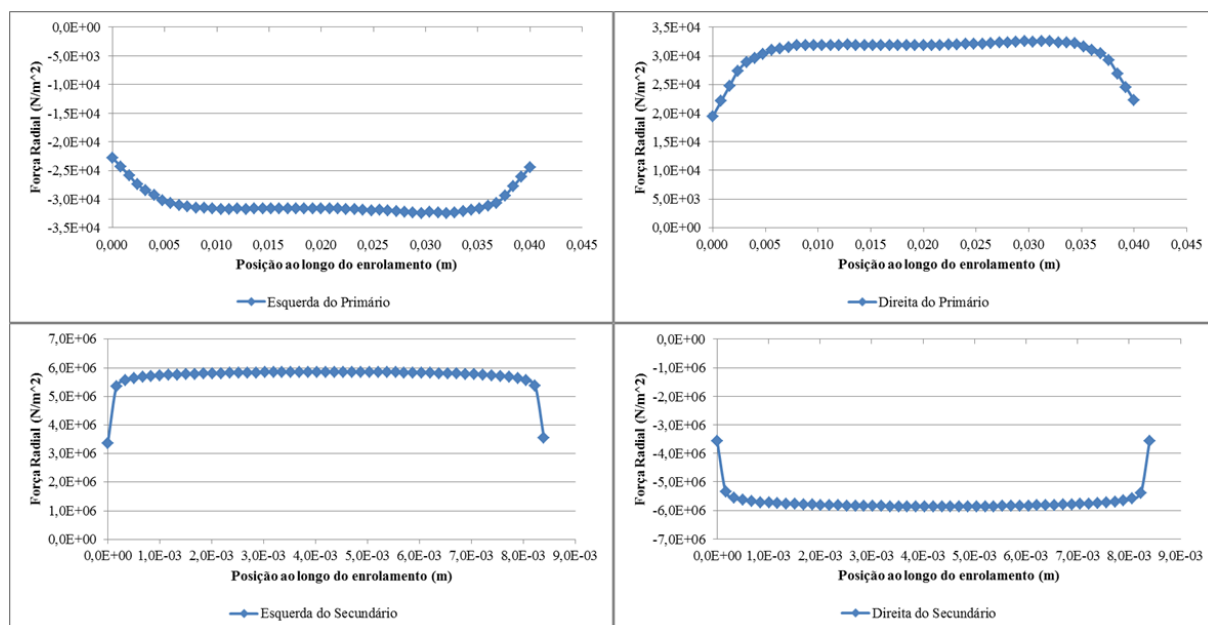


Figura 3.79: Forças radiais nos enrolamentos do LCS no primeiro pico de corrente limitada.

Da Figura 3.80, na qual encontram-se representadas as forças axiais quando o LCS indutivo está em funcionamento normal, pode-se retirar que no primário os esforços no seu extremo inferior são aproximadamente 4 vezes maiores que no superior. Já no secundário as forças são incrementadas a medida que existe uma aproximação dos extremos, situação que corresponde às expectativas. Neste ponto de funcionamento observa-se que de igual forma que nas forças radiais, os valores dos esforços são notavelmente superiores no secundário do que no primário.

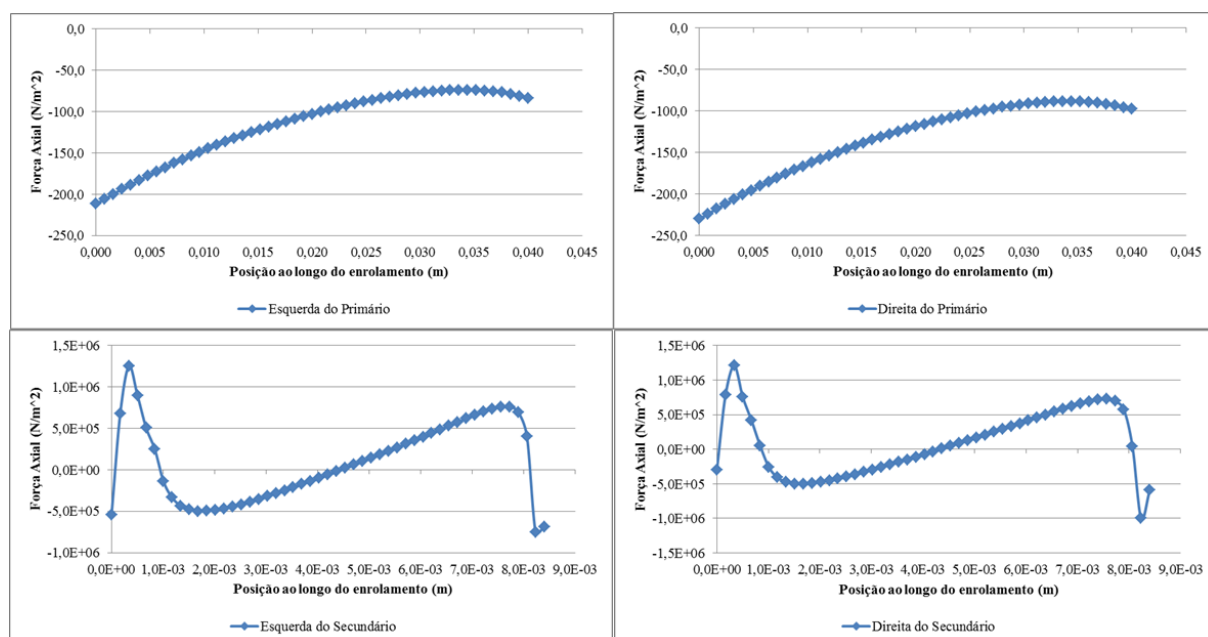


Figura 3.80: Forças axiais nos enrolamentos do LCS em funcionamento normal.

Relativamente às situações de pico de corrente de curto-circuito e pico de corrente limitada, ilustradas em Figura 3.81 e Figura 3.82, é observável que em ambos os enrolamentos as forças axiais

aumentam com a aproximação aos extremos. Ainda verifica-se que estas forças têm um comportamento que é aproximadamente linear ao longo da altura das bobinas. Já nestas duas situações as intensidades das forças rondam os MN/m^2 , valores notavelmente superiores aos obtidos no funcionamento normal.

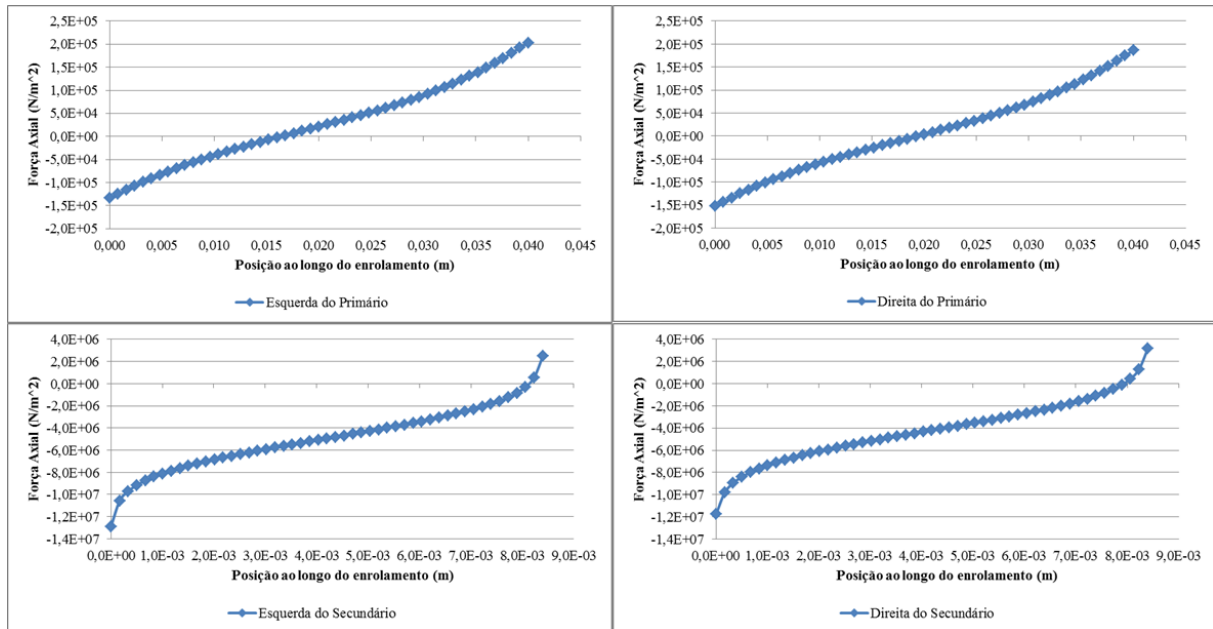


Figura 3.81: Forças Axiais nos enrolamentos do LCS no pico de corrente de curto-circuito.

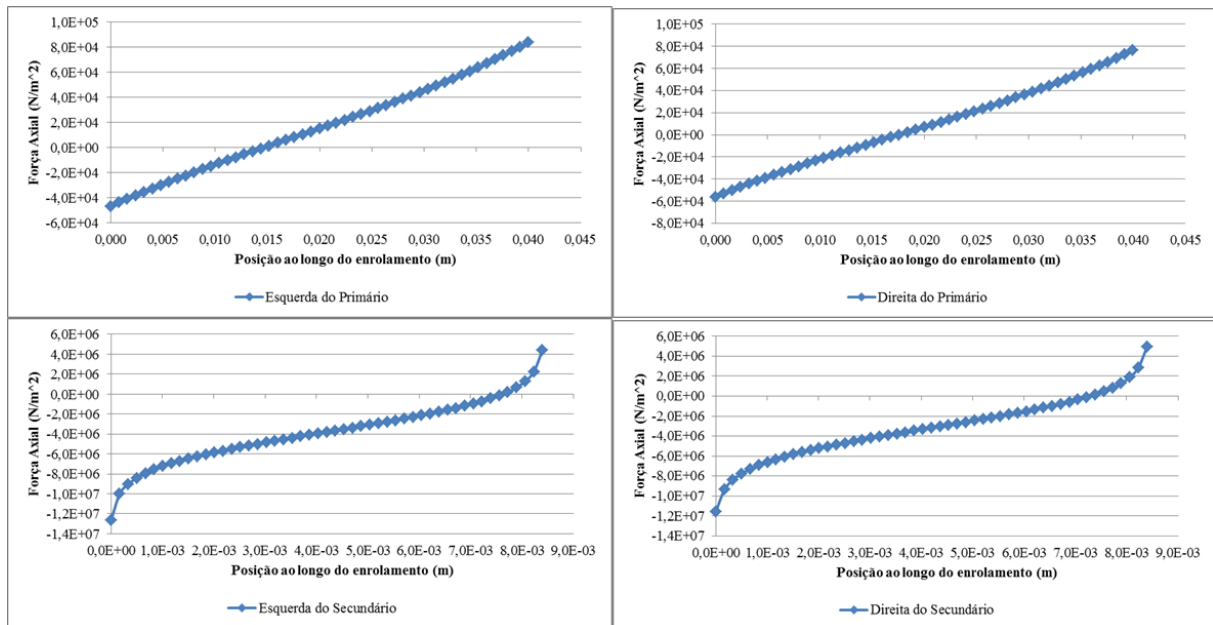


Figura 3.82: Forças Axiais nos enrolamentos do LCS no primeiro pico de corrente limitada.

Tendo em consideração a Figura 3.14, das curvas de elasticidades, e tendo em atenção que o LCS em estudo apresenta enrolamentos com os mesmos materiais dos dispositivos estudados anteriormente, obtém-se a Tabela 3.11. São expostos os valores máximos de tensão mecânica verificados nos enrolamentos resultantes da simulação, somente para a situação do pico de corrente de curto-circuito, e as razões em percentagens que relacionam estes valores com os limites de tensão elástica, “*yield*”.

Tabela 3.11: Comparação da tensão mecânica obtida por simulação nos enrolamentos do LCS indutivo, na situação de curto-circuito, com o limite admissível.

| Secção de Bobina | LCS indutivo | |
|------------------------|----------------|---------------|
| | F [kN/m^2] | $F/yield(\%)$ |
| Esquerda do Primário | 227,05 | 0,32 |
| Direita do Primário | 208,36 | 0,29 |
| Esquerda do Secundário | 1337,2 | 1,19 |
| Direita do Secundário | 1235,8 | 1,10 |

No caso do LCS indutivo verifica-se que os esforços máximos exercidos sobre os enrolamentos, na situação de falha simulada, não constituem um perigo para a integridade física do primário mas sim para a do secundário. A conclusão anterior é retirada do facto de que a percentagem de deformação do cobre encontra-se abaixo do limite a partir do qual as deformações são plásticas. No caso do material supercondutor observa-se que os valores dos esforços geram percentagens de deformação que levam à ruptura da fita.

4 Conclusão

4.1 Considerações Gerais

Nesta dissertação foi simulado um protótipo de transformador monofásico e um trifásico, assim como dois modelos de limitadores, um limitador indutivo e um de núcleos saturados.

Nos resultados das simulações teve-se em consideração as limitações do programa de elementos finitos, pois este realiza as análises em duas dimensões.

Quanto aos esforços no transformador monofásico conclui-se que estes apresentam algumas características esperadas, isto é, as forças radiais no primário possuem intensidades inferiores no transformador convencional do que no supercondutor, e se mantêm na situação de defeito. Nas forças radiais existentes nos enrolamentos secundários dos modelos verifica-se a existência de um incremento quando comparadas as simulações no dispositivo convencional e no supercondutor. Quanto às forças axiais, observou-se que ambas bobinas sofrem maiores esforços nas extremidades e consequentemente uma compressão radial no centro da altura dos enrolamentos. Nos dois modelos de simulação, à medida que se aumenta o valor da carga pode-se observar que o intervalo de variação das forças e os máximos que elas tomam aumentam, sendo que perante curto-circuito estes máximos chegam a ser várias ordens de grandeza superiores. Relativamente ao limite de tensão elástica, pode-se afirmar que para as magnitudes dos esforços resultantes das simulações em curto-circuito, não geram deformações significantes nos materiais, ou seja, as deformações são elásticas.

Das simulações sobre os modelos de transformador trifásico sem irregularidades, retira-se que os esforços têm o comportamento esperado na segunda e terceira fases, isto é, presença de esforços radiais de compressão normalmente nos enrolamentos internos e de tracção nos externos. Na primeira fase verifica-se uma mudança nos sentidos dos esforços, devido ao comportamento da distribuição do fluxo magnético de dispersão que afecta os enrolamentos. Quanto às forças axiais neste dispositivo observa-se que a curva segue a forma desejada, ou seja, crescimento das intensidades consoante existe aproximação das extremidades dos enrolamentos onde ocorre a descomposição do campo de indução magnético.

Nos ensaios sobre os transformadores com irregularidades verificou-se que na situação de deslocação axial dos enrolamentos secundários de cada fase, as forças radiais apresentam características semelhantes às do transformador ideal, divergindo nas regiões em que os esforços radiais e axiais começam a variar. As forças axiais mostram-se mais intensas nas alturas dos enrolamentos onde existe uma diferença de comprimento, ou seja, nos secundários são maiores nas proximidades da extremidade inferior e no primário nas proximidades da extremidade superior.

No transformador trifásico com derivação no secundário da segunda fase, observou-se na fase central que os esforços radiais diminuem no primário consoante se aproxima do canto superior do enrolamento, mas as forças axiais sofrem um aumento nessa região. No secundário verificou-se que os esforços axiais apresentam curvas com parecenças às que se obtêm para o transformador sem irregularidades, mas os esforços radiais mostram crescimento consoante a aproximação do extremo superior.

Em todas as situações visualizou-se que os esforços incrementam algumas ordens de grandeza quando comparados os transformadores convencionais com os supercondutores. Também que no geral existe um acréscimo nas intensidades das forças presentes nos enrolamentos internos às janelas do transformador. Mas em nenhum dos ensaios se obtiveram resultados que indicassem a possibilidade de degradação dos enrolamentos, pois as deformações provocadas encontram-se distantes do limite de elasticidade.

Quanto ao LCS de núcleos saturados conclui-se que os esforços exercidos nos enrolamentos deste dispositivo comportam-se como esperado, pois as curvas apresentam características similares às dos transformadores, tal como suposto no início do desenvolvimento deste trabalho. Verificou-se que as forças radiais e axiais presentes no enrolamento de polarização mantêm-se aproximadamente constantes no funcionamento em presença de falha relativamente ao funcionamento normal. Por outro lado nos enrolamentos ligados à linha existe um significativo aumento nos valores das forças de um ponto de funcionamento em relação ao outro. Mesmo na presença de esforços de esta magnitude existentes nos enrolamentos do LCS, pode-se concluir que os enrolamentos de cobre e de material supercondutor admitem valores de força mais elevados sem ficar danificados, pois as forças contabilizadas geram uma deformação longe do limite de elasticidade dos materiais.

Quanto ao LCS indutivo, verificou-se que perante uma situação de curto-circuito o limitador apresenta uma limitação de 68,1% da corrente de defeito. Visualiza-se que em ambos os enrolamentos do modelo, nas situações de funcionamento normal e em presença de falha, as forças radiais e axiais têm um comportamento semelhante ao encontrado geralmente nas bobinas dos transformadores. Pode-se apreciar ainda que os esforços são ligeiramente superiores na região entre as bobinas, comprovando-se uma vez mais que as forças nos enrolamentos encontram-se estreitamente ligadas aos fenómenos de origem magnética. Neste limitador indutivo verifica-se que os esforços exercidos sobre os enrolamentos, na situação de falha simulada, não atentam contra a integridade física do primário mas no secundário existe risco de ruptura.

4.2 Trabalho Futuro

Como trabalho futuro será necessário realizar um estudo mais aprofundado dos esforços, fazendo diferenciação entre os efeitos no interior e exterior dos enrolamentos. Também é crucial a validação dos resultados obtidos nas simulações, através de medições em protótipos dos dispositivos estudados. Com o intuito de gerar resultados laboratoriais de alta precisão será imprescindível a busca e desenvolvimento de ferramentas de medição das grandezas em estudo, densidade de fluxo de dispersão, forças radiais e forças axiais.

Referências Bibliográficas

- American Superconductors*. (s.d.). Obtido em 20 de Junho de 2014, de AMSC: <http://www.amscom.com/>
- Arsénio, P. M. (2012). *Desenvolvimento e Análise de um Limitador de Corrente Indutivo Baseado em Fita Supercondutora Bi-2223*. Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia. <http://hdl.handle.net/10362/8494>.
- Azevedo, A. C. (2007). *Estresse Electromecânico em Transformadores Causado por Curto-Circuitos "Passantes" e Correntes de Energização*. Univesidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Eléctrica. <http://repositorio.ufu.br/handle/123456789/250>.
- Azevedo, A. C., Delaiba, A., Oliveira, J., Carvalho, B., & Bronzeado, H. (2007). Transformer mechanical stress caused by external short-circuit: a time domain approach. *International Conference on Power Systems Transients (IPTS'07)*. Lyon, France. Obtido em 20 de Janeiro de 2014, de ResearchGate: https://www.researchgate.net/publication/232237777_Transformer_mechanical_stress_caused_by_external_short-circuit_a_time_domain_approach
- Azevedo, A. C., Rezende, I., Delaiba, A. C., Oliveira, J. C., Carvalho, B., & Bronzeado, H. (s.d.). Forças Eletromagnéticas em Transformadores Causadas por Curtos-Circuitos Externos: Investigação Utilizando FEM. Obtido em 01 de 07 de 2014, de ResearchGete: https://www.researchgate.net/publication/234009066_Foras_Eletromagnticas_em_Transformadores_Causadas_por_Curtos-Circuitos_Externos_Investigao_Utilizando_FEM
- Bartley, P. (2003). Analysis of Transformer Failures. *International Association of Engineering Insurers, 36th Annual Conference*. Stockholm.
- Cabanes Aracil, J., Lopez-Roldan, J., Coetzee, J., Darmann, F., & Tang, T. (2012). Analysis of electromagnetic forces in high voltage superconducting fault current limiters with saturated core. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, <http://eprints.qut.edu.au/48522/>, 1087-1093.
- CAN Superconductors*. (s.d.). Obtido em 20 de Junho de 2014, de <http://www.can-superconductors.com/>
- CIGRE, G. d. (1983). Enquête Internationale sur les Défaillances en Service des Transformateurs de Grande Puissance. *ELECTRA*, No. 88.
- Eccoflow*. (s.d.). Obtido em Outubro de 2014, de <http://www.eccoflow.org/>
- Electropedia*. (s.d.). Obtido em 3 de Junho de 2014, de <http://www.electropedia.org>
- Ferreira, R. B. (2013). *Construção e Ensaio de um Limitador de Corrente Supercondutor Trifásico do Tipo Indutivo de Blindagem Magnética*. Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia . <http://hdl.handle.net/10362/11114>.

- Figueira, P. R. (2013). *Projecto e construção de um transformador de potência supercondutor*. Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia. <http://hdl.handle.net/10362/10258>.
- Franzén, A., & Karlsson, S. (2007). *Failure Modes and Effects Analysis of Transformers*. Obtido de FMEA Info Centre: http://www.fmeainfocentre.com/updates/TRITA-EE_2007_040.pdf
- Han, T. H., Choi, H. S., Lim, S. H., & Lee, N. Y. (2007). Recovery characteristics of flux-lock type superconducting fault current limiter. In *Physica C* (pp. 463-465, 1209-1212).
- Hatta, H., Nitta, T., Shirai, Y., & Fujikawa, K. (2002). Studies of Characteristics and Design of Superconducting Fault Current Limiter with Adjustable Trigger Current Level in Current Limiting Operation. *Electrical Engineering in Japan*, 141, 30-38.
- Husek, I., Kovác, P., & Jones, H. (2004). *Tensile stress applied to NbTi, Nb3Sn, Bi-2223 and MgB2 composite superconductors at room temperature*. Obtido em Outubro de 2014, de IOPScience: (<http://iopscience.iop.org/0953-2048/17/12/009>)
- Junior, A. J. (2010). *Estimativa dos Esforços Electromecânicos em Transformadores Submetidos a um Curto-Circuito Trifásico*. Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica. <http://repositorio.ufu.br/handle/123456789/299>.
- Lim, S. -H., Choi, H. -S., & Han, B. -S. (2004). The fault current limiting characteristics of a flux-lock type high-Tc superconducting fault current limiter using series resonance. *Cryogenics*, 44, 249-254.
- Lim, S. -H., Kang, H. -G., Choi, H. -S., Lee, S. -R., & Han, B. -S. (2003). Current Limiting Characteristics of Flux-Lock Type High-TC Superconducting Fault Current Limiter With Control Circuit for Magnetic Field. *IEEE Transaction on Applied Superconductivity*, 13, 2056-2059.
- Mahomed, N. (2011). Electromagnetic forces in transformers under short circuit conditions. *Energize Magazine*, 36-40.
- Matsumura, T., Kimura, A., Shimizu, H., Yokomizu, Y., & Goto, M. (2003). Fundamental Performance of Flux-Lock Type Current Limiter With Two Air-Core Coils. *IEEE transactions on Applied Superconductivity*, 13, 2024-2027.
- Matsumura, T., Uchii, T., & Yokomizu, Y. (1997). Development of Flux-Lock-Type Fault Current Limiter with High-TC Superconducting Element. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 7, 1001-1004.
- Matsumura, T., Uchii, T., & Yokomizu, Y. (1999). Proposal of Flux-Lock-Type Fault Current Limiter with High-Tc Superconducting Element. *Electrical Engineering in Japan*, 127, 31-38.
- Minhas, M. S. (2007). *Dynamic Behaviour of Transformer Winding under Short-Circuit*. University of the Witwatersrand, Faculty of Engineering. Johannesburg: <http://wiredspace.wits.ac.za/handle/10539/4764?show=full>.
- Nexans. (s.d.). Obtido em 20 de Junho de 2014, de <http://www.nexans.com>

- Nogueira, A. F. (2009). *Cálculo de forças eletromecânicas pelos métodos do trabalho virtual e tensor de Maxwell*. Obtido em 9 de Maio de 2014, de Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC): <http://www.joinville.udesc.br/portal/professores/nogueira/materiais/>
- Osamura, K., Nyilas, A., Weiss, K., Shin, H., Katagiri, K., Ochiai, S., . . . Ohsawa, K. (2010). International round Robin test for mechanical properties of BSCCO-2223 superconductive tapes at room temperature. *ELSEVIER*, 21-26. Obtido em Setembro de 2014, de ScienceDirect: http://ac.els-cdn.com/S0011227510001979/1-s2.0-S0011227510001979-main.pdf?_tid=56530c90-4f98-11e4-b407-00000aabb0f27&acdnat=1412847823_285470ebb1393990fd69ce0fe4adf2eb
- Pina, J. (2010). *Desenho e Modelização de Sistemas de Energia Empregando Materiais Supercondutores de Alta Temperatura*. Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia. <http://hdl.handle.net/10362/5059>.
- Pina, J. M., Ventim Neves, M., Álvarez, A., & Rodrigues, A. L. (2010). *Reverse Engineering of Inductive Fault Current Limiters*. Obtido em 3 de Janeiro de 2014, de IOPscience: <http://iopscience.iop.org/1742-6596/234/3/032047>
- Pina, J. M., Ventim Neves, M., Álarz, A., & Rodrigues, A. (2010). High Temperature Superconducting Fault Current Limiters as Enabling Technology in Electrical Grids with Increased Distributed Generation Penetration. In L. Camarinha-Matos, P. Pereira, & L. Ribeiro, *Emerging Trends in Technological Innovation* (pp. IFIP AICT 314: 427-434). Costa de Caparica, Portugal: SpringerBerlin Heidelberg.
- Raju, B., Parton, K., & Bartram, T. (1982). A Current Limiting Device Using Superconducting D.C. Bias Applications and Prospects. *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on PAS-101(9)*, (pp. 3173-3177).
- Roylance, D. (Agosto de 2001). *Stress-Strain Curves*. Obtido em Setembro de 2014, de MITOPENCOURSEWARE: <http://ocw.mit.edu/courses/materials-science-and-engineering/3-11-mechanics-of-materials-fall-1999/modules/ss.pdf>
- Saraiva, E. (2011). *Um estudo das alterações dos parâmetros de transformadores oriundas de deformações nos enrolamentos: uma contribuição para o diagnóstico de vida útil*. Universidade federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Eléctrica. <http://repositorio.ufu.br/handle/123456789/340>.
- Silva, T. A. (2013). *Construção, ensaio e modelização de um limitador de corrente supercondutor*. Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia. <http://hdl.handle.net/10362/9928>.
- Vilhena, N. M. (2012). *Construção e Ensaio de um Limitador de Corrente Supercondutor de Núcleos Saturados*. Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia. <http://hdl.handle.net/10362/8516>.
- Wang, M., Vandermaar, A., & Srivastava, K. (2002). *Review of condition assessment of power transformers in service*. Obtido em 2014, de Scribd:

<https://pt.scribd.com/doc/37616617/Review-of-Condition-Assessment-of-Power-Transformers-in-Service>

Waters, M. (1966). *The Short Circuit Strength of Power Transformers*. London: Macdonald & Co.

Wikipedia. (s.d.). Obtido em 3 de Agosto de 2014, de http://en.wikipedia.org/wiki/Bathtub_curve